

Universitat Politècnica de Catalunya
Barcelona Tech
Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona
Departament d'Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental
Institut Flumen UPC-CIMNE

TESIS DOCTORAL

DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA Y VELOCIDAD EN EMBALSES

*Análisis numérico-experimental aplicado a los embalses de Sau (Ter) y
Ribarroja (Ebro)*

Marina Arbat-Bofill

ID: L-5361-2013

ORCID ID: 0000-0003-3081-3099

Directores:

Martí Sánchez-Juny

Ernest Bladé i Castellet

Memoria presentada para obtener el grado de:
Doctora por la Universitat Politècnica de Catalunya
Programa de doctorado en Ingeniería Civil

Barcelona, junio de 2015

Anejo 1 Lista de publicaciones, comunicaciones en congresos, participación en proyectos y otras contribuciones

1.1 Artículos

Referencia completa del artículo: López, Pilar; Dolz, Josep; Arbat-Bofill, Marina; Armengol, Joan (2011). "Physical and chemical characterisation of superficial sediment of the Ribarroja Reservoir (River Ebro, NE Spain)". *Limnetica*, vol. 31, núm. 2, pàgs. 327-340. ISSN: 0213-8409. Índice de impacto: 1.113

1.2 Comunicaciones en congresos

1.2.1 Año 2014

Autores: Arbat-Bofill, Marina; Sánchez-Juny, M.; Bladé, E.; Niñerola, D.; Dolz, J.; Palau, A.

Título de la presentación: "Hydrodynamics of Ribarroja Reservoir (Ebro River, Spain): water temperature, water velocities and water age"

Nombre del congreso: River Flow 2014. 7th International Conference on Fluvial Hydraulics.

Formato (póster / comunicación oral): Comunicación oral / Texto en actas de congreso.

Localidad y país: Lausanne, Suiza

Fecha: 3-7/09/2014

Autores: Arbat-Bofill, Marina; Bladé, E.; Sánchez-Juny, M.; Niñerola, D.; Dolz, J.

Título de la presentación: "Suspended sediment dynamics of Ribarroja Reservoir (Ebro River, Spain)"

Nombre del congreso: River Flow 2014. 7th International Conference on Fluvial Hydraulics.

Formato (póster / comunicación oral): Comunicación oral / Texto en actas de congreso.

Localidad y país: Lausanne, Suiza

Fecha: 3-7/09/2014

1.2.2 Año 2013

Autores: Arbat-Bofill, Marina.

Título de la presentación: "Estudio de la calidad del agua del embalse de Ribarroja de Ebro: Curiosidades sobre los efectos de la temperatura del agua y el transporte de sedimentos en el embalse"

Nombre del congreso: Cicle de conferències Penyafort UB

Formato (póster / comunicación oral): Comunicación oral.

Localidad y país: Barcelona, Espanya

Fecha: 11/03/2013

Autores: Arbat-Bofill, Marina; Sánchez-Juny, M.; Bladé, E.; Niñerola, D.; Dolz, J.

Título de la presentación: “Estudio de la hidrodinámica del embalse de Ribarroja de Ebro: datos experimentales versus modelización 2D”

Nombre del congreso: III Jornadas de Ingeniería del Agua La protección contra los riesgos hídricos.

Formato (póster / comunicación oral): Comunicación oral / Texto en actas de congreso.

Localidad y país: Valencia, España

Fecha: octubre 2013

Autores: Prats-Rodríguez, J.; Arbat-Bofill, Marina; Marti, B.; Dolz, J.; Armengol, J.

Título de la presentación: “Utilidad de los sensores térmicos aerotransportados en estudios de hidrodinámica de embalses y ríos”

Nombre del congreso: III Jornadas de Ingeniería del Agua La protección contra los riesgos hídricos.

Formato (póster / comunicación oral): Comunicación oral / Texto en actas de congreso.

Localidad y país: Valencia, España

Fecha: octubre 2013

Autores: Arbat-Bofill, Marina; Sánchez-Juny, M.; Bladé, E.; Dolz, J.; Niñerola, D.

Título de la presentación: “Estudio de la hidrodinámica del embalse de Ribarroja de Ebro a partir de datos de campo.”

Nombre del congreso: VI Seminario sobre las Líneas Prioritarias de la Red de Laboratorios de Hidráulica de España.

Formato (póster / comunicación oral): Comunicación oral.

Localidad y país: Madrid, España

Fecha: junio 2013

1.2.3 Año 2012

Autores: Arbat-Bofill, Marina; Sánchez-Juny, M.; Bladé, E.; Prats, J.; Dolz, J.

Título de la presentación: "Experimental study of thermal stratification in monomictic reservoirs. The case of Riba-roja reservoir in Ebro River (Spain)"

Nombre del congreso: HMEM Congress - The Environmental & Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers.

Formato (póster / comunicación oral): Comunicación oral.

Localidad y país: Snowbird, Utah (USA).

Fecha: 14/08/2012

Autores: Estrella, S.; Sánchez-Juny, M.; Dolz, J.; Arbat-Bofill, Marina.

Título de la presentación: "Velocity And Air Concentration In Air-Water Flow: Application On A Stepped Spillway Without Sidewalls".

Nombre del congreso: HMEM Congress - The Environmental & Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers.

Formato (póster / comunicación oral): Comunicación oral.

Localidad y país: Snowbird, Utah (USA).

Fecha: 14/08/2012

Autores: Arbat-Bofill, Marina; Sánchez-Juny, M.; Bladé, E.; Dolz, J..

Título de la presentación: “Simulación 2D de la evolución de la temperatura en embalses mediante el modelo CE-QUAL-W2. Casos de Sau (Río Ter) y Ribarroja (Río Ebro)”

Nombre del congreso: XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica 2012.

Formato (póster / comunicación oral): Comunicación oral.

Localidad y país: San José, Costa Rica.

Fecha: 2012

1.2.4 Año 2011

Autores: Arbat-Bofill, Marina; Bladé, E.; Sánchez-Juny, M.; Dolz, J.

Título de la presentación: “Modelització numérica 2D en embassaments; temperatura i transport de sediments a l'embassament de Riba-Roja (riu Ebre)”

Nombre del congreso: Jornada de Recerca i Innovació a l'Escola de Camins 2011.

Formato (póster / comunicación oral): Comunicación oral.

Localidad y país: Barcelona, España.

Fecha: 2011

Autores: Arbat-Bofill, Marina; Sánchez-Juny, M.; Bladé, E.; Dolz, J.

Título de la presentación: “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)”

Nombre del congreso: IIas Jornadas de Ingeniería del Agua: modelos numéricos en dinámica fluvial: Barcelona 5 y 6 de octubre de 2011.

Formato (póster / comunicación oral): Comunicación oral.

Localidad y país: Barcelona, España.

Fecha: 5 y 6 de octubre de 2011.

Autores: Bladé, E.; Corestein, G.; Arbat-Bofill, Marina; Caro, C.; Ruiz-Villanueva, V.; Soler, J.

Título de la presentación: “La modelización numérica de procesos fluviales: más allá de la hidrodinámica”

Nombre del congreso: IIas Jornadas de Ingeniería del Agua: modelos numéricos en dinámica fluvial: Barcelona 5 y 6 de octubre de 2011.

Formato (póster / comunicación oral): Comunicación oral.

Localidad y país: Barcelona, España.

Fecha: 5 y 6 de octubre de 2011.

1.2.5 Año 2010

Autores: Bladé, E.; Arbat-Bofill, Marina; Sánchez-Juny, M.; Dolz, J.; Cobos, G.; Polanco, L.

Título de la presentación: “Dinámica sedimentaria del extremo aguas arriba del embalse de Ribarroja (río Ebro)”.

Nombre del congreso: XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica. 2010.

Formato (póster / comunicación oral): Seminario / exposición oral.

Localidad y país: Punta del Este, Uruguay.

Fecha: 2010.

Autores: Arbat-Bofill, Marina; Blade, E.; Sanchez-Juny, M.; Dolz, J.

Título de la presentación: “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”.

Nombre del congreso: Actividad experimental de I*D*i en ingeniería hidráulica en España. Seminarios 2010. Universitat Politècnica de València.

Formato (póster / comunicación oral): Congreso internacional / exposición oral / comunicación en libro del congreso.

Localidad y país: Valencia, España.

Fecha: 2010.

Autores: Arbat-Bofill, Marina; Bladé, E.; Sánchez-Juny, M.; Dolz, J.; Cobos, G.; Polanco, L.

Título de la presentación: “Estudio en modelo numérico del transporte sólido en suspensión del río Segre en la cola del embalse de Ribarroja de Ebro”

Nombre del congreso: Dam maintenance and rehabilitation II: proceedings of the 2nd international congress on dam maintenance and rehabilitation

Formato (póster / comunicación oral): Congreso internacional / exposición oral / comunicación en libro del congreso.

Localidad y país: Zaragoza, España.

Fecha: 2010.

Autores: Arbat-Bofill, Marina; Bladé, E.; de Pourcq, K.; Sánchez-Juny, M.; Dolz, J.; López, P.; Jaime, F.; Armengol, J.

Título de la presentación: “Dinámica sedimentaria del extremo aguas arriba del embalse de Ribarroja (río Ebro)”

Nombre del congreso: II International Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation

Formato (póster / comunicación oral): Congreso internacional / comunicación en libro del congreso.

Localidad y país: Zaragoza, España.

Fecha: 2010.

Autores: López, P.; Armengol, J.; Dolz, J.; Arbat-Bofill, Marina; Jaime, F..

Título de la presentación: "Caracterización física y química del sedimento superficial del embalse de Ribarroja"

Nombre del congreso: II International Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation

Formato (póster / comunicación oral): Congreso internacional / comunicación en libro del congreso.

Localidad y país: Zaragoza, España.

Fecha: 2010.

Autores: Arbat-Bofill, Marina; Bladé, E.; Sánchez-Juny, M.; Dolz, J..

Título de la presentación: "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."

Nombre del congreso: Actividad Experimental de I+D+i en Ingeniería Hidráulica en España. Publicacions de la Universitat de València (PUV).

Formato (póster / comunicación oral): Seminario / exposición oral.

Localidad y país: Valencia, España.

Fecha: 2010.

1.2.6 Año 2009

Autores: Arbat-Bofill, Marina; Sánchez-Juny, M.; Bladé, E.; Dolz, J.

Título de la presentación: “Modelación bidimensional del Embalse de Ribarroja de Ebro con CE-QUAL-W2”.

Nombre del congreso: Jornadas de Ingeniería del Agua 2009.

Formato (póster / comunicación oral): Comunicación oral.

Localidad y país: Barcelona, España.

Fecha: 2009.

Autores: Arbat-Bofill, Marina; Salgado, A.; González, O.; Sánchez-Juny, M.; Bladé, E.; Dolz, J.

Título de la presentación: “Modelación unidimensional del Embalse de Ribarroja de Ebro con DYRESM”.

Nombre del congreso: Jornadas de Ingeniería del Agua 2009.

Formato (póster / comunicación oral): póster.

Localidad y país: Barcelona, España.

Fecha: 2009.

Autores: de Pourcq, K.; Roura, M.; Arbat-Bofill, Marina; Armengol, J.; Dolz, J.

Título de la presentación: “Incidencia de los embalses de Mequinenza y Ribarroja en el transporte de sólido en suspensión del río Ebro”.

Nombre del congreso: Actividad Experimental de I+D+i en Ingeniería Hidráulica en España. Publicacions de la Universitat de València (PUV).

Formato (póster / comunicación oral): Comunicación oral.

Localidad y país: Barcelona, España.

Fecha: Febrero de 2009.

Autores: Arbat-Bofill, Marina; Sánchez-Juny, M.; Bladé, E.

Título de la presentación: "Introducción a la modelización numérica de embalses, caso del embalse de Ribarroja de Ebro".

Nombre del congreso: Actividad Experimental de I+D+i en Ingeniería Hidráulica en España. Publicacions de la Universitat de València (PUV).

Formato (póster / comunicación oral): Comunicación oral.

Localidad y país: Barcelona, España.

Fecha: Febrero 2009.

1.3 Participación en Proyectos

Nombre: Dinàmica fluvial i enginyeria hidrològica

Proyecto competitivo (Sí o No): Sí

Entidad que financia: AGAUR 2014 SGR 319

Rol (coordinador o coordinadora científica, participante...): Investigador

Fecha de inicio: 2014

Fecha de finalización: 2016

Nombre: GRUP DE RECERCA FLUMEN

Proyecto competitivo (Sí o No): Sí

Entidad que financia: AGAUR 2009 SGR 1139

Rol (coordinador o coordinadora científica, participante...): Investigador

Fecha de inicio: 30/09/2009

Fecha de finalización: 30/04/2014

Nombre: Estudio de la dinámica sedimentaria en la confluencia Ebro/Segre

Proyecto competitivo (Sí o No): No

Entidad que financia: ENDESA SERVICIOS, S.L.

Rol (coordinador o coordinadora científica, participante...): Investigador

Fecha de inicio: 01/11/2011

Fecha de finalización: 01/11/2012

Nombre: Estudio dinámica sedimentaria en la confluencia Ebre-Segre

Proyecto competitivo (Sí o No): No

Entidad que financia: CONFED. HIDROGRÁFICA DEL EBRO

Rol (coordinador o coordinadora científica, participante...): Investigador

Fecha de inicio: 07/11/2011

Fecha de finalización: 31/12/2013

Nombre: Estudio del tiempo de residencia del agua en el embalse de Ribarroja

Proyecto competitivo (Sí o No): No

Entidad que financia: Endesa Generación, S.A.

Rol (coordinador o coordinadora científica, participante...): Investigador

Fecha de inicio: 01/10/2011

Fecha de finalización: 31/12/2013

Nombre: PATROCINI II JORNADES SOBRE GESTIO SOSTENIBLE D'EMBASSAMENTS

Proyecto competitivo (Sí o No): No

Entidad que financia: Endesa, S.A..

Rol (coordinador o coordinadora científica, participante...): Investigador

Fecha de inicio: 01/03/2010

Fecha de finalización: 01/03/2010

Nombre: ESTUDI HIDRÀULIC EN MODEL NUMÈRIC DE LA HIDRODINÀMICA DE L'EMBASSAMENT DE SAU AL RIU TER

Proyecto competitivo (Sí o No): No

Entidad que financia: AIGÜES TER LLOBREGAT.

Rol (coordinador o coordinadora científica, participante...): Investigador

Fecha de inicio: 17/12/2009

Fecha de finalización: 17/12/2012

Nombre: Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del Embalse de Ribarroja

Proyecto competitivo (Sí o No): No

Entidad que financia: CONFED. HIDROGRÁFICA DEL EBRO

Rol (coordinador o coordinadora científica, participante...): Investigador

Fecha de inicio: 2009

Fecha de finalización: 2009

1.4 Organización de actividades I+D

Nombre de la actividad: River Flow 2014

Rol (presidente o presidenta, secretario o secretaria, vocal, ayudante o ayudanta...): Co-Chairperson

Localidad y país: Lausanne, Suiza.

Fecha: 3-7/09/2011

Nombre de la actividad: 2ª Edición de las Jornadas de Ingeniería del Agua (Barcelona)

Rol (presidente o presidenta, secretario o secretaria, vocal, ayudante o ayudanta...): Secretaria (Comité Organizador)

Localidad y país: Barcelona, España.

Fecha: 5-7/10/2011

1.5 Asistencia a Cursos y seminarios

1.5.1 Año 2014

Nombre del curso, seminario o congreso: River Flow 2014. 7th International Conference on Fluvial Hydraulics.

Entidad organizadora: IAHR-CEDEX.

Localidad y país: EPFL Lausanne, Suiza

Fecha de inicio: 3/09/2014

Fecha de finalización: 7/09/2014

1.5.2 Año 2013

Nombre del curso, seminario o congreso: IIIas Jornadas de Ingeniería del Agua

Entidad organizadora: Universitat Politècnica de Valencia

Localidad y país: Valencia, España

Fecha de inicio: 23/10/2013

Fecha de finalización: 24/10/2013

Nº. de horas asistidas:

Nombre del curso, seminario o congreso: An Introduction to interactive Programming in Python

Entidad organizadora: COURSERA – Rice University

Localidad y país: Online

Fecha de inicio: 04/2013

Fecha de finalización: 07/2013

Nº. de horas asistidas:

1.5.3 Año 2012

Nombre del curso, seminario o congreso: HMEM Congress - The Environmental & Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers.

Entidad organizadora: ASCE

Localidad y país: Snowbird, Utah, Estados Unidos

Fecha de inicio: 14/08/2012

Fecha de finalización: 16/08/2012

Nombre del curso, seminario o congreso: Gerhard Jirka Summer School on Environmental Fluid Mechanics - from theory to applications.

Entidad organizadora: Alfred Wüest

Localidad y país: Lucerna, Suiza

Fecha de inicio: 10/06/2012

Fecha de finalización: 20/06/2012

1.5.4 Año 2011

Nombre del curso, seminario o congreso: Ilas Jornadas de Ingeniería del Agua. Modelos numéricos en dinámica fluvial.

Entidad organizadora: Flumen

Localidad y país: Barcelona, España

Fecha de inicio: 5/10/2011

Fecha de finalización: 6/10/2011

Nombre del curso, seminario o congreso: Cursos d'estiu de l'SLT-Academic.
Communication Resources-112-10/11

Entidad organizadora: SLT UPC

Localidad y país: Barcelona, España

Fecha de inicio: 21/07/2011

Fecha de finalización: 21/07/2011

Nº. de horas asistidas: 3 h

Nombre del curso, seminario o congreso: Cursos d'estiu de l'SLT-Taller sobre recursos
per a la redacció científica-114-10/11

Entidad organizadora: SLT UPC

Localidad y país: Barcelona, España

Fecha de inicio: 15/07/2011

Fecha de finalización: 15/07/2011

Nº. de horas asistidas: 3 h

Nombre del curso, seminario o congreso: Formació en Scopus

Entidad organizadora: Biblioteca Gabriel Ferraté

Localidad y país: Barcelona, España

Fecha de inicio: 30/03/2011

Fecha de finalización: 30/03/2011

Nº. de horas asistidas: 3 h

1.5.5 Año 2010

Nombre del curso, seminario o congreso: II International Congress on Dam Maintenance and Rehabilitation

Entidad organizadora: SEPREM

Localidad y país: Zaragoza, España

Fecha de inicio: 23/11/2010

Fecha de finalización: 25/11/2010

Nombre del curso, seminario o congreso: III Seminario sobre las Líneas Prioritarias A "Criterios hidromorfológicos para la restauración de espacios fluviales", B "Hidrodinámica de embalses. Gestión sostenible de embalses", C "Riesgo asociado a la escorrentía Urbana" y D "Seguridad en presas. Aspectos hidráulicos e hidrológicos" de la Red de Laboratorios de Hidráulica de España.

Entidad organizadora: RLHE

Localidad y país: Valencia, España

Fecha de inicio: 01/06/2010

Fecha de finalización: 01/06/2010

Nombre del curso, seminario o congreso: GESTIÓ DEL RISC D'INUNDACIÓ

Entidad organizadora: Flumen

Localidad y país: Barcelona, España

Fecha de inicio: 2010

Fecha de finalización: 2010

Nº. de horas asistidas: 5 crèdits

Nombre del curso, seminario o congreso: CURSO DE HIDROLOGIA URBANA

Entidad organizadora: Flumen, CIMNE y UPC

Localidad y país: Barcelona, España

Fecha de inicio: 20/01/2010

Fecha de finalización: 22/01/2010

Nº. de horas asistidas: 20 h

1.5.6 Año 2009

Nombre del curso, seminario o congreso: Curso de modelización numérica en ríos en dos dimensiones. Programa CARPA

Entidad organizadora: Flumen UPC

Localidad y país: Barcelona, España

Fecha de inicio: 27/10/2009

Fecha de finalización: 28/10/2009

Nombre del curso, seminario o congreso: Curso práctico sobre el uso de la herramienta AQUATOOL en la modelación de sistemas de recursos hídricos.

Entidad organizadora: Universitat Politècnica de Valencia

Localidad y país: Barcelona, España

Fecha de inicio: 04/05/2009

Fecha de finalización: 06/05/2009

Nº. de horas asistidas: 17 h

Nombre del curso, seminario o congreso: las Jornadas de Ingeniería del Agua. Agua y Energía.

Entidad organizadora: CEDEX

Localidad y país: Madrid, España

Fecha de inicio: 27/10/2009

Fecha de finalización: 28/10/2010

Nombre del curso, seminario o congreso: I Seminario sobre las Líneas Prioritarias A " Criterios hidromorfológicos para la restauración de espacios fluviales" y B " Hidrodinámica de embalses. Gestión sostenible de embalses".

Entidad organizadora: RLHE

Localidad y país: Barcelona, España

Fecha de inicio: 24/02/2009

Fecha de finalización: 24/02/2009

1.5.7 Año 2008

Nombre del curso, seminario o congreso: Jornadas sobre la incidencia de los embalses en la dinámica fluvial. Opciones para una gestión sostenible

Entidad organizadora: Flumen

Localidad y país: Barcelona, España

Fecha de inicio: 18/02/2008

Fecha de finalización: 20/02/2008

Nombre del curso, seminario o congreso: Acreditació de becari de suport a la docència

Entidad organizadora: Universitat Politècnica de Catalunya - ETSECCPB

Localidad y país: Barcelona, España

Fecha de inicio: 10/2007

Fecha de finalización: 07/2008

Nº. de horas asistidas: 4 h

Nombre del curso, seminario o congreso: Formació bàsica d'Atenea per a becaris de col·laboració

Entidad organizadora: Universitat Politècnica de Catalunya - ICE

Localidad y país: Barcelona, España

Fecha de inicio: 21/11/2007

Fecha de finalización: 21/11/2007

Nº. de horas asistidas: 4 h

1.6 Becas de doctorado

Nombre de la ayuda, beca o contrato: Beca per a la recerca a l'estranger (BE-DGR 2011) -
Modalitat A

Núm. de la convocatoria: Predoctoral

Entidad que concede la ayuda o beca: Generalitat de Catalunya (AGAUR)

Fecha de inicio: 06/2012

Fecha de finalización: 12/2012

Nombre de la ayuda, beca o contrato: FI-B GENERALITAT DE CATALUNYA

Núm. de la convocatoria: Predoctoral

Entidad que concede la ayuda o beca: Generalitat de Catalunya (AGAUR)

Fecha de inicio: 01/2010

Fecha de finalización: 12/2012

Nombre de la ayuda, beca o contrato: FI-A GENERALITAT DE CATALUNYA

Núm. de la convocatoria: Predoctoral

Entidad que concede la ayuda o beca: Generalitat de Catalunya (AGAUR)

Fecha de inicio: 05/2009

Fecha de finalización: 12/2009

1.7 Estancias en otros centros de investigación

Nombre de la Universidad, centro: Water Quality Research Group - Portland State University (PSU)

Nombre de la persona responsable de la estancia: Scott Wells

Localidad y país: Portland, Oregon. Estados Unidos.

Objetivo de la estancia: Colaborar con los autores de CE-QUAL-W2, proponer mejoras en el programa, adaptar modelos numéricos a casos de estudio.

Fecha de inicio: 22/09/2012

Fecha de finalización: 22/12/2012

Duración: 3 meses

Nombre de la universidad, centro: Tahoe Environmental Research Center (TERC) - University of California Davis (UCD)

Nombre de la persona responsable de la estancia: Geoffrey Schladow

Localidad y país: Tahoe City/Incline Village, California/Nevada. Estados Unidos.

Objetivo de la estancia: Trabajo de campo, Lago Tahoe.

Fecha de inicio: 22/06/2012

Fecha de finalización: 21/09/2012

Duración: 3 meses

Nombre de la universidad, centro: Hochschule Luzern - Technik & Architektur. EAWAG - Aquatic research.

Nombre de la persona responsable de la estancia: Alfred Wüest

Localidad y país: Lucerna, Suiza.

Objetivo de la estancia: Gerhard Jirka Summer School on Environmental Fluid Mechanics - from theory to applications.

Fecha de inicio: 11/06/2012

Fecha de finalización: 20/06/2012

Duración: 10 días

Nombre de la universidad, centro: Universidade da Coruña. GEAMA, Grupo de Enxeñaría da Auga e do Medio Ambiente.

Nombre de la persona responsable de la estancia: Luis Cea

Localidad y país: A Coruña, España.

Objetivo de la estancia: Formación en Modelo FreeFlow.

Fecha de inicio: 23/01/2011

Fecha de finalización: 30/01/2011

Duración: 1 semana

1.8 Impartición de docencia

Nombre de la actividad, curso, materia: Curso de CE-QUAL-W2

Entidad organizadora: Instituto Flumen UPC-EDU

Localidad y país: Barcelona, España

Fecha de inicio: 2015

Fecha de finalización: 2015

Duración: 5 h (online)

Nombre de la actividad, curso, materia: Hidráulica de Conducciones

Entidad organizadora: ETSECCPB - Universitat Politècnica de Catalunya

Localidad y país: Barcelona, España

Fecha de inicio: 2009

Fecha de finalización: 2015

Duración: años académicos 2009-2015

Nombre de la actividad, curso, materia: Water Resources Engineering

Entidad organizadora: Maseeh College of Engineering & Computer Science (Portland State University)

Localidad y país: Portland, Oregon (USA)

Fecha de inicio: 2009

Fecha de finalización: 2015

Duración: 4 créditos

Nombre de la actividad, curso, materia: Dinámica Fluvial

Entidad organizadora: ETSECCPB - Universitat Politècnica de Catalunya

Localidad y país: Barcelona, España

Fecha de inicio: 2009

Fecha de finalización: 2015

Duración: 3-4 h cada curso

Nombre de la actividad, curso, materia: Hidráulica e Hidrología

Entidad organizadora: ETSECCPB -. Universitat Politècnica de Catalunya

Localidad y país: Barcelona, España

Fecha de inicio: 2008-2010

Fecha de finalización: 2010

Duración: curso académico

Nombre de la actividad, curso, materia: Dirección y co-dirección de Proyectos/Tesinas final de carrera

Entidad organizadora: ETSECCPB -. Universitat Politècnica de Catalunya

Localidad y país: Barcelona, España

Fecha de inicio: 2009

Fecha de finalización: 2015

Duración: años académicos 2011-2015

Anejo 2 Calendario juliano

Conversión de fechas del calendario juliano al gregoriano.

JULIAN DATE CALENDAR PERPETUAL

Day	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Day
1	001	032	060	091	121	152	182	213	244	274	305	335	1
2	002	033	061	092	122	153	183	214	245	275	306	336	2
3	003	034	062	093	123	154	184	215	246	276	307	337	3
4	004	035	063	094	124	155	185	216	247	277	308	338	4
5	005	036	064	095	125	156	186	217	248	278	309	339	5
6	006	037	065	096	126	157	187	218	249	279	310	340	6
7	007	038	066	097	127	158	188	219	250	280	311	341	7
8	008	039	067	098	128	159	189	220	251	281	312	342	8
9	009	040	068	099	129	160	190	221	252	282	313	343	9
10	010	041	069	100	130	161	191	222	253	283	314	344	10
11	011	042	070	101	131	162	192	223	254	284	315	345	11
12	012	043	071	102	132	163	193	224	255	285	316	346	12
13	013	044	072	103	133	164	194	225	256	286	317	347	13
14	014	045	073	104	134	165	195	226	257	287	318	348	14
15	015	046	074	105	135	166	196	227	258	288	319	349	15
16	016	047	075	106	136	167	197	228	259	289	320	350	16
17	017	048	076	107	137	168	198	229	260	290	321	351	17
18	018	049	077	108	138	169	199	230	261	291	322	352	18
19	019	050	078	109	139	170	200	231	262	292	323	353	19
20	020	051	079	110	140	171	201	232	263	293	324	354	20
21	021	052	080	111	141	172	202	233	264	294	325	355	21
22	022	053	081	112	142	173	203	234	265	295	326	356	22
23	023	054	082	113	143	174	204	235	266	296	327	357	23
24	024	055	083	114	144	175	205	236	267	297	328	358	24
25	025	056	084	115	145	176	206	237	268	298	329	359	25
26	026	057	085	116	146	177	207	238	269	299	330	360	26
27	027	058	086	117	147	178	208	239	270	300	331	361	27
28	028	059	087	118	148	179	209	240	271	301	332	362	28
29	029		088	119	149	180	210	241	272	302	333	363	29
30	030		089	120	150	181	211	242	273	303	334	364	30
31	031		090		151		212	243		304		365	31

Figura 1. Conversión de fechas del calendario juliano al gregoriano, Años normales no bisiestos

En los años bisiestos se añade el 29 de febrero, por lo que tiene un día más (366). Como es el caso del año 2008:

JULIAN DATE CALENDAR
FOR LEAP YEARS ONLY

Day	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Day
1	001	032	061	092	122	153	183	214	245	275	306	336	1
2	002	033	062	093	123	154	184	215	246	276	307	337	2
3	003	034	063	094	124	155	185	216	247	277	308	338	3
4	004	035	064	095	125	156	186	217	248	278	309	339	4
5	005	036	065	096	126	157	187	218	249	279	310	340	5
6	006	037	066	097	127	158	188	219	250	280	311	341	6
7	007	038	067	098	128	159	189	220	251	281	312	342	7
8	008	039	068	099	129	160	190	221	252	282	313	343	8
9	009	040	069	100	130	161	191	222	253	283	314	344	9
10	010	041	070	101	131	162	192	223	254	284	315	345	10
11	011	042	071	102	132	163	193	224	255	285	316	346	11
12	012	043	072	103	133	164	194	225	256	286	317	347	12
13	013	044	073	104	134	165	195	226	257	287	318	348	13
14	014	045	074	105	135	166	196	227	258	288	319	349	14
15	015	046	075	106	136	167	197	228	259	289	320	350	15
16	016	047	076	107	137	168	198	229	260	290	321	351	16
17	017	048	077	108	138	169	199	230	261	291	322	352	17
18	018	049	078	109	139	170	200	231	262	292	323	353	18
19	019	050	079	110	140	171	201	232	263	293	324	354	19
20	020	051	080	111	141	172	202	233	264	294	325	355	20
21	021	052	081	112	142	173	203	234	265	295	326	356	21
22	022	053	082	113	143	174	204	235	266	296	327	357	22
23	023	054	083	114	144	175	205	236	267	297	328	358	23
24	024	055	084	115	145	176	206	237	268	298	329	359	24
25	025	056	085	116	146	177	207	238	269	299	330	360	25
26	026	057	086	117	147	178	208	239	270	300	331	361	26
27	027	058	087	118	148	179	209	240	271	301	332	362	27
28	028	059	088	119	149	180	210	241	272	302	333	363	28
29	029	060	089	120	150	181	211	242	273	303	334	364	29
30	030		090	121	151	182	212	243	274	304	335	365	30
31	031		091		152		213	244		305		366	31

USE IN 2004, 2008, 2012, 2016, 2020, 2024, ETC.

Figura 2. Conversión de fechas del calendario juliano al gregoriano, Años normales no bisiestos

Anejo 3 Condición de contorno de temperatura del agua de entrada al embalse de Ribarroja de Ebro

3.1.1 Introducción

El modelo CE-QUAL-W2 necesita datos de entrada de temperaturas del agua y caudales de entrada para la condición de contorno aguas arriba (tanto del Ebro, saliendo por la presa de Mequinenza, como del efluente, el río Segre). Debido a la poca disponibilidad de datos para las condiciones de contorno de temperatura del agua de ambas entradas para los años 2009 y 2010 se procedió a buscar la propuesta de solución más óptima para aportar estos datos. Con tal de estudiar los efectos de una elección u otra a lo largo de la longitud del embalse se realizó además un análisis de sensibilidad.

3.1.2 Datos de entrada

Se dispone de datos de temperatura del agua promediados diariamente para los años 1998 y 1999 (fruto de la tesis de Rafael Val, 2004). Las series de datos de temperatura para el periodo 1998-1999 son prácticamente completas y de buena calidad por lo que se propone utilizar estos datos como condiciones de contorno para las simulaciones de 2009-2010.

En las figuras siguientes se muestran los datos de caudales y temperaturas (promedios diarios) para las diferentes entradas a la cola del embalse de Ribarroja. Las estaciones de aforo se encontraban en la presa de Mequinenza, Aitona y Serós (Segre), Fraga para el Cinca (aguas arriba de la confluencia con el Segre).

Promedios diarios de caudales de entrada al embalse de Ribarroja de Ebro para los años 1998 y 1999

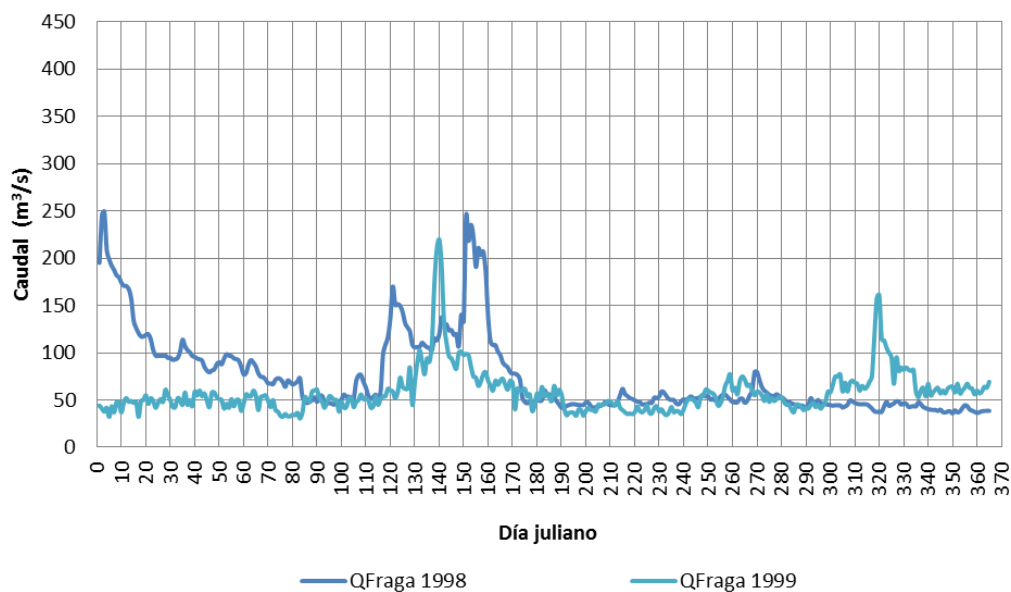


Figura 3. Datos de caudal en la estación de Fraga para los años 1998 y 1999. Promedios diarios. Fuente: Val, R. 2003.

Promedios diarios de caudales de entrada al embalse de Ribarroja de Ebro para los años 1998 y 1999

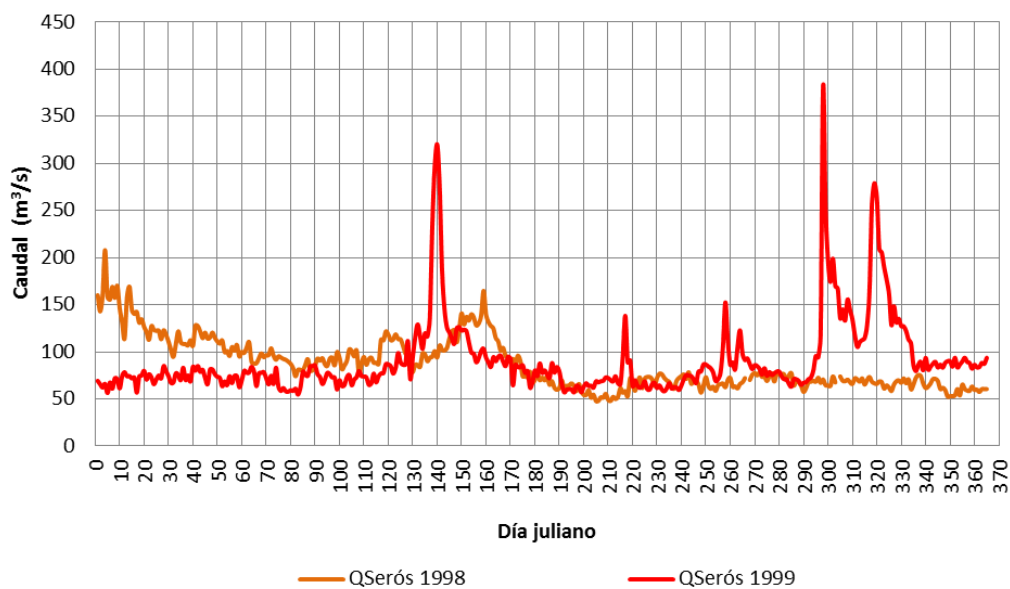


Figura 4. Datos de caudal en la estación de Serós para los años 1998 y 1999. Promedios diarios. Fuente: Val, R. 2003.

Promedios diarios de caudales de entrada al embalse de Ribarroja de Ebro para los años 1998 y 1999

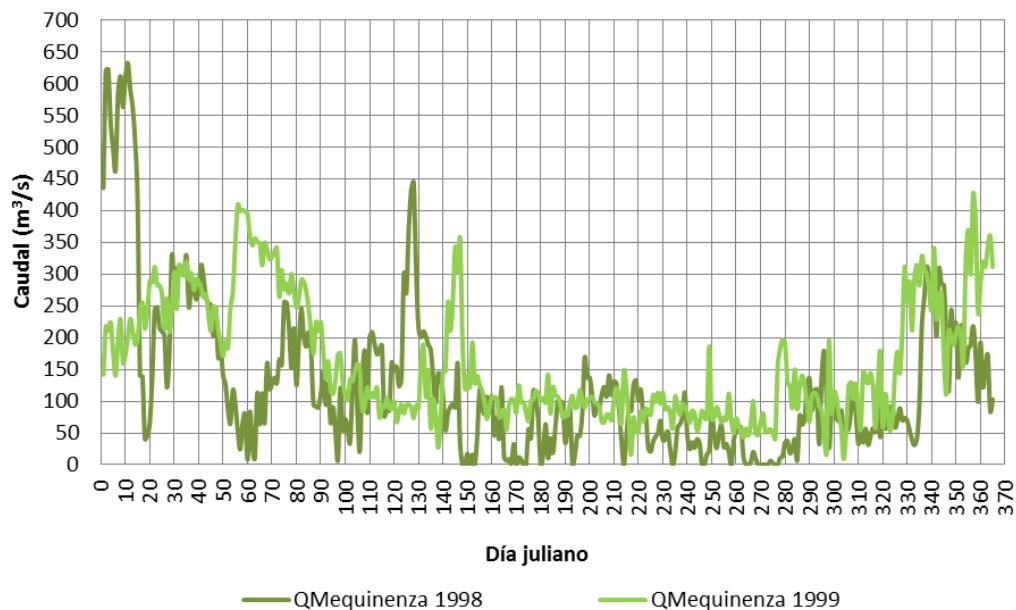


Figura 5. Datos de caudal en la salida de la presa de Mequinenza para los años 1998 y 1999. Promedios diarios.
Fuente: Val, R. 2003.

En el estudio de caudales se analizan inicialmente las entradas de los ríos Segre (Figura 4), Cinca (Figura 3) y Ebro (Figura 5) por separado. Se comparan los datos correspondientes al año 1998 y 1999. Se puede apreciar que en los tres primeros meses de 1998 el caudal es superior a los caudales de 1999 para las mismas fechas. El año 1999 presenta dos picos de caudal de entrada importantes entre los días 120-140. De los días 170 al 300 la tendencia de ambos años en cuanto a caudales es bastante similar. En otoño, la serie de caudales de 1999 presenta picos de caudal importantes (llegando a los 250 m³/s) entre los días 290-340. En cuanto a los caudales salientes por la presa de Mequinenza se puede apreciar una tendencia mucho más regular que en el caso del Segre y el Cinca; a parte de ciertos picos puntuales se puede observar que la tendencia de caudales es muy similar entre los días 150-330 para los años 1998-1999.

En cuanto a temperaturas del agua se presentan las temperaturas del agua de cada punto de toma (Segre, Cinca y Mequinenza) y se comparan los años 1998 con 1999. Desde inicios de año hasta los 3 primeros meses las temperaturas del agua en Aitona-Fraga del 1998 están unos 2°C por encima de los correspondientes para 1999. A continuación la tendencia es más similar hasta el día 130. A partir del día 130 las tendencias 98-99 se separan hasta 3°C siendo superiores las temperaturas del agua de año 99 (especialmente marcado en la estación de

Fraga). Alrededor del día 200 las líneas de temperatura se vuelven a juntar dando aproximadamente la misma línea de tendencia, mucho más constante y sin demasiadas variaciones (a salvo de casos puntuales/diarios).

Datos de temperatura en Aitona y Fraga para los años 1998 y 1999 (media diaria)

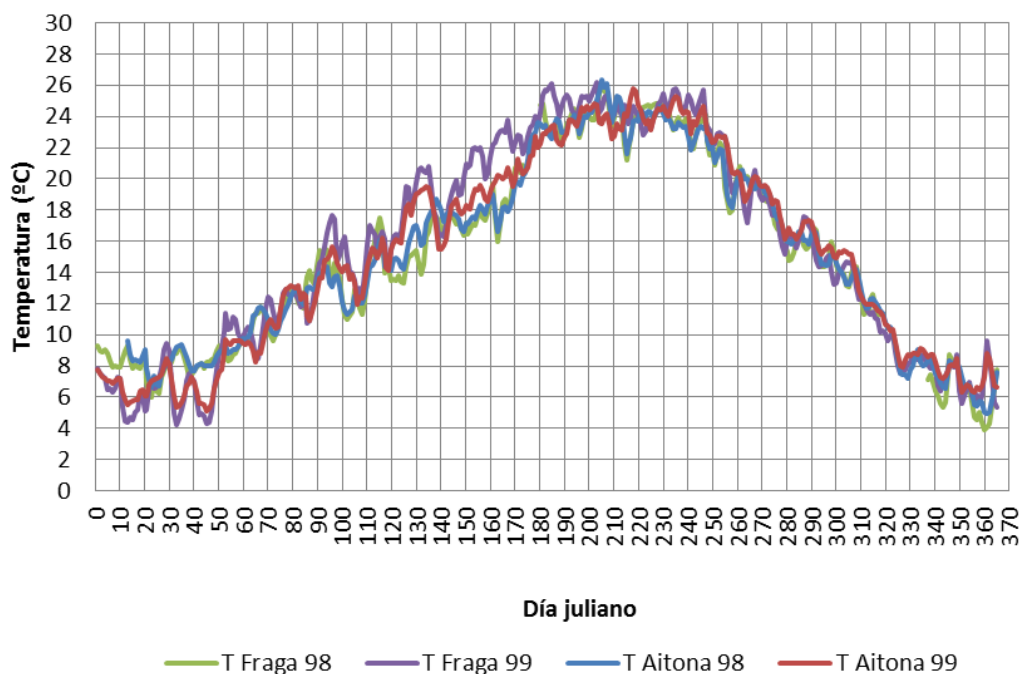


Figura 6. Datos de temperatura del agua en las estaciones de Aitona y Fraga para los años 1998 y 1999. Promedios diarios. Fuente: Val, R. 2003.

Las líneas de temperatura del agua saliente de la presa de Mequinenza son muchas más constantes y sin demasiadas variaciones diarias. Aun así, las diferencias 1998-1999 muestran un inicio de año fueron más fríos que los correspondientes a 1998 (diferencias de un grado). Entre los días 129-240 se puede apreciar una falta de datos importante en cuanto a temperaturas del agua en el río Ebro; pero la tendencia de subida y los valores que se presentan son muy similares entre ambos años. En cuanto al estudio de temperaturas del agua cabe destacar que debido a la inercia del calentamiento del agua las temperaturas del Ebro en Mequinenza presentan un retraso en calentamiento y en la llegada el punto máximo (día 250 en Mequinenza, mientras que en el Segre y el Cinca el máximo es alrededor del día 220).

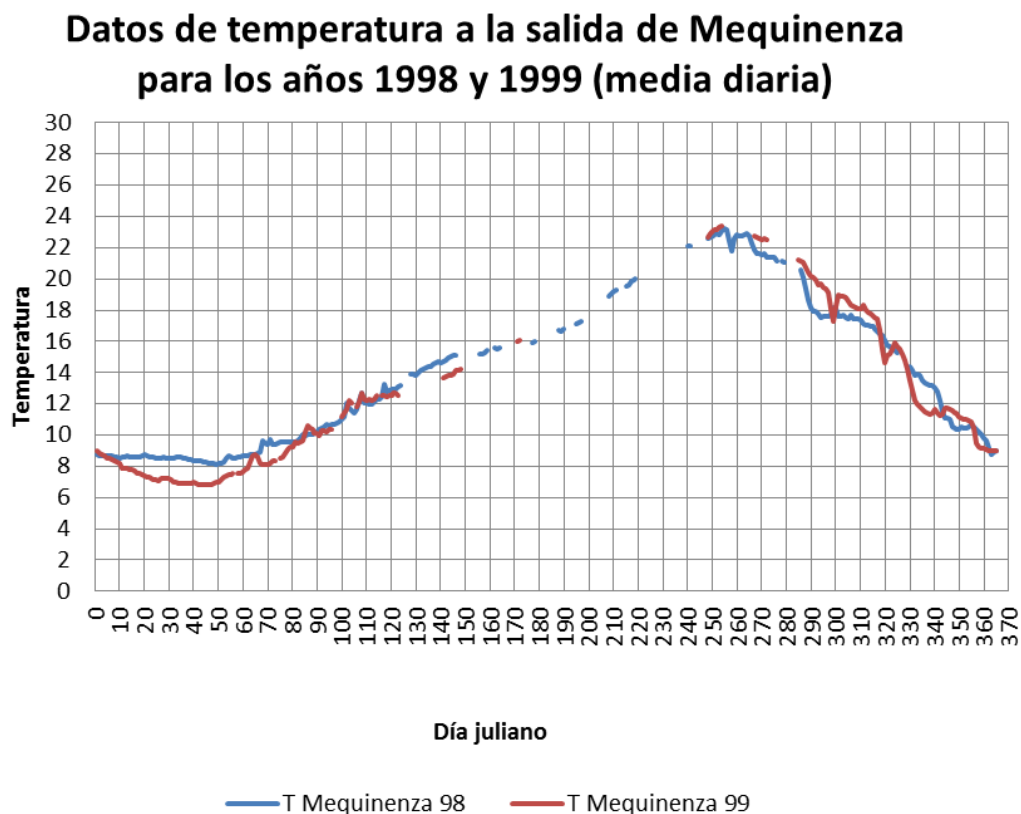


Figura 7. Datos de temperatura del agua a la salida de la presa de Mequinenza para los años 1998 y 1999. Promedios diarios. Fuente: Val, R. 2003.

Para el estudio se utiliza una malla que contempla únicamente la entrada puntual del Segre en uno de los segmentos de la cola del embalse; por lo que las entradas del Segre ya se contemplan unidas con el Cinca. Puesto que se disponía de caudales y temperaturas del agua por separado se procedió a calcular el total de la suma de caudales (Segre + Cinca) y la temperatura del agua resultante se ha promediado en función del caudal de ambos ríos directamente.

Los promedios diarios de caudal entrante por el Ebro (QIN) y el Segre + Cinca (QTR) se muestran en la Figura 8 para los años 1998 y 1999 respectivamente.

Promedios diarios QIN QTR años 1998 y 1999

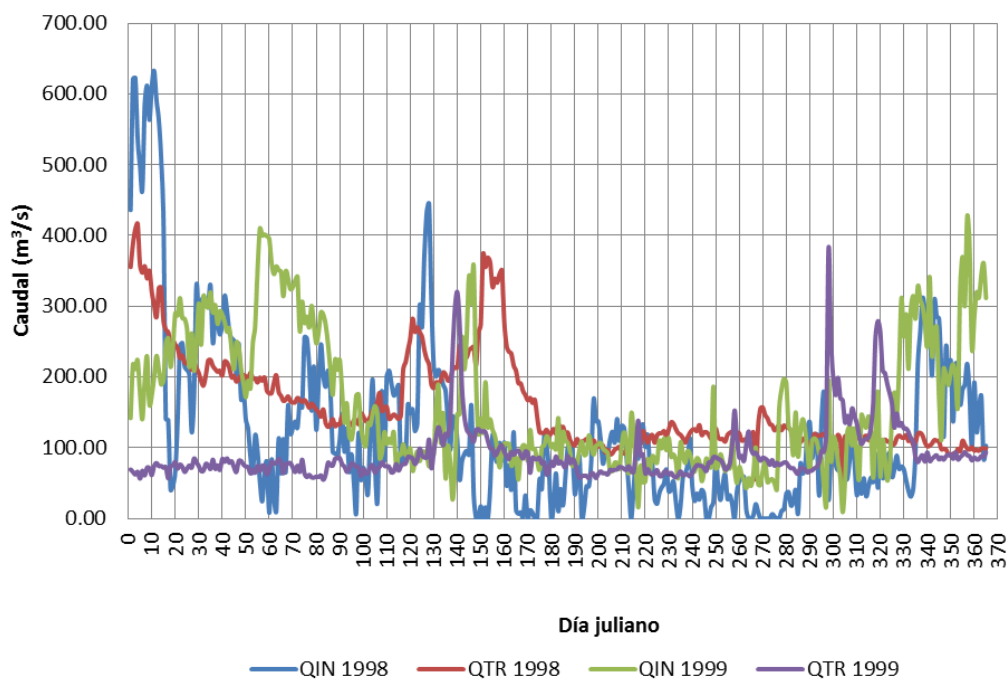


Figura 8. Datos de caudales de entrada por Mequinenza (QIN) y del tributario Segre + Cinca (QTR) para los años 1998 y 1999. Promedios diarios.

En estudiar los promedios diarios y los datos meteorológicos del periodo 1998-1999 se pueden observar divergencias entre los dos años. Algunas divergencias que se pueden apreciar en los hidrogramas son la existencia de ciertas avenidas donde se pueden apreciar caudales importantes superando los 300 m³/s (especialmente en los primeros y últimos meses de ambos años). Las diferencias entre los años 1998 y 1999 en cuanto a régimen de caudales se pueden apreciar en la Figura 9.

La Figura 9 muestra la diferencia de caudales de entrada 1998-1999; temperatura de entrada por Mequinenza (QIN) 1998-1999; y análogamente para el tributario Segre+Cinca (QTR). En la Figura 10 se puede apreciar que las diferencias importantes de caudal tienen lugar a principios de año, inicialmente el año 1998 presenta caudales superiores al 1999 y en cambio, para el período 50-100 las diferencias son negativas (1998 caudales inferiores a 1999). En la misma figura se pueden apreciar diferencias menos importantes repartidas a lo largo de año; sobretodo propiciadas por eventos puntuales/diarios.

Diferencia de caudales de entrada al embalse de Ribarroja de Ebro entre 1998 y 1999

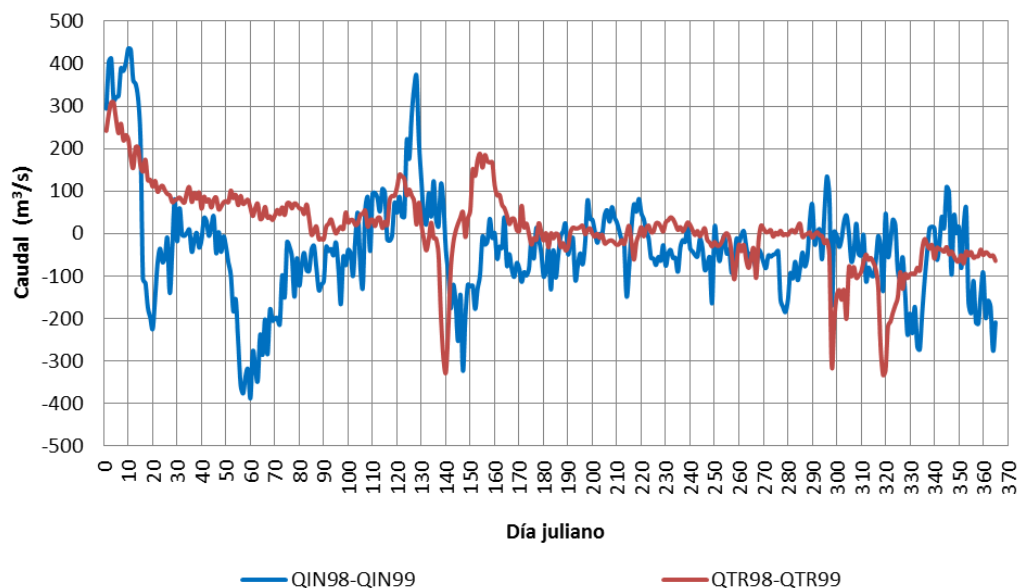


Figura 9. Diferencia entre los caudales de entrada al embalse de Ribarroja de Ebro entre 1998 y 1999. En azul se muestra la diferencia de caudales de Mequinzena (QIN) y en rojo la diferencia de caudales de la entrada por el Segre (TTR). Se resta el año 1999 del 1998, por lo tanto, diferencias positivas corresponden a mayor caudal en 1998 que en 1999; y viceversa, valores negativos muestran caudales superiores en 1999 que en 1998.

Además, en el efecto sobre las temperaturas del agua – especialmente las del río Segre - también se nota la influencia de algunos fenómenos meteorológicos, especialmente tormentas o nubosidad que pueden provocar disminuciones de temperatura importantes. En las figuras siguientes se muestran una correlación de los datos de temperatura del agua con la temperatura del aire (estación meteorológica de Ribarroja de Ebro, datos recogidos en la Tesis de Rafael Val, 2004). Las estaciones están separadas varios kilómetros pero permite hacerse una idea de las condiciones meteorológicas del día.

Correlación entre temperatura del aire y temperatura del agua en las entradas de Ribarroja de Ebro (año 1998)

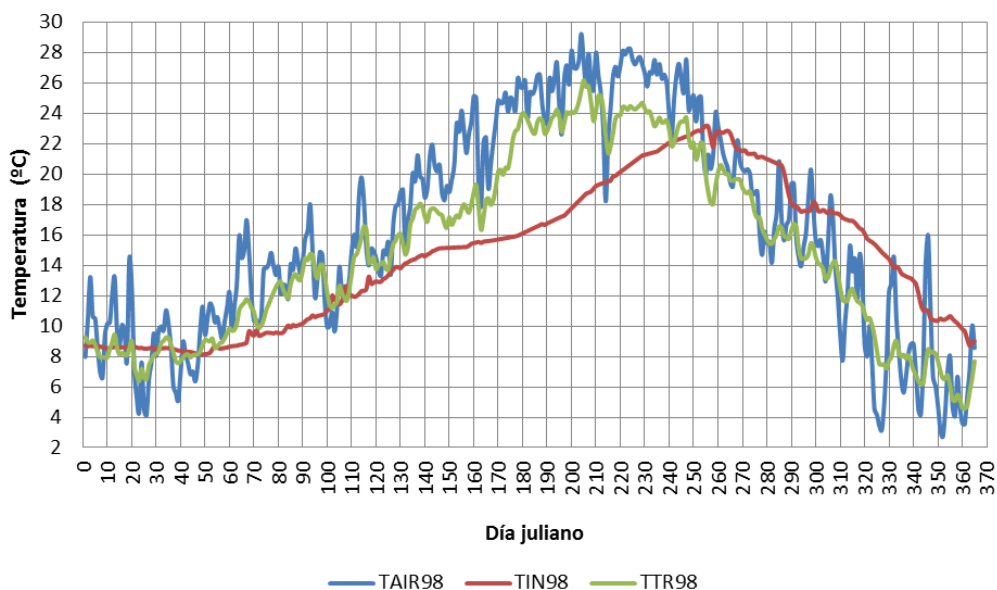


Figura 10. Correlación temperatura del aire - temperatura del agua para las entradas de agua de Ribarroja de Ebro, año 1998. Se puede apreciar una mayor correlación con las entradas del Segre puesto que las salidas de la presa de Mequinenza no se ven afectadas directamente por la meteorología.

Correlación entre temperatura del aire y temperatura del agua en las entradas de Ribarroja de Ebro (año 1999)

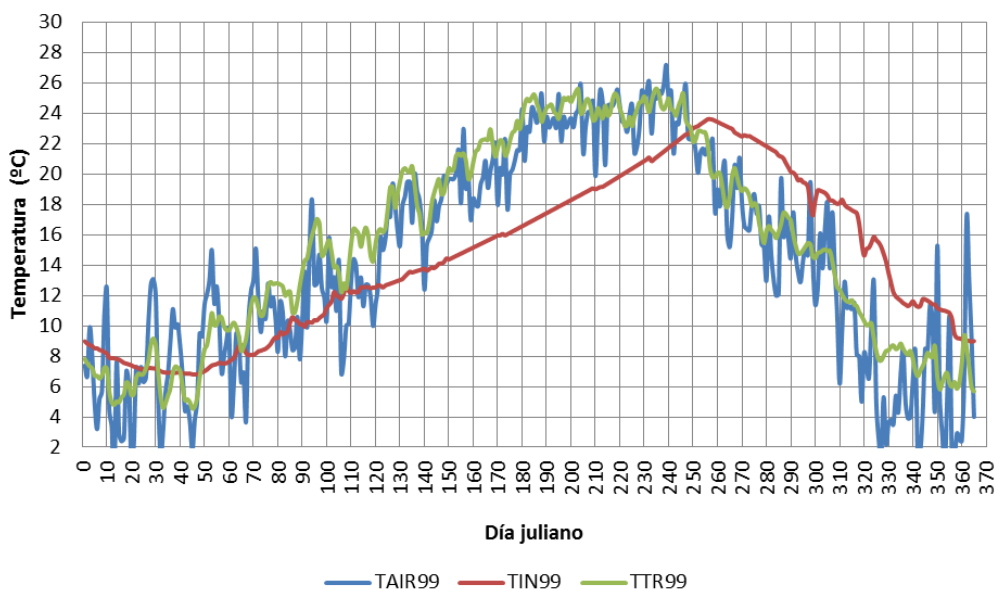


Figura 11. Correlación temperatura del aire - temperatura del agua para las entradas de agua de Ribarroja de Ebro, año 1999. Se puede apreciar una mayor correlación con las entradas del Segre puesto que las salidas de la presa de Mequinenza no se ven afectadas de manera directa por la meteorología.

En las figuras anteriores se muestra la correlación entre la temperatura del aire (azul) y la temperatura del agua de las dos entradas al embalse de Ribarroja de Ebro (Mequinenza en

rojo y Segre+Cinca en verde). Se puede observar una correlación clara entre la temperatura del aire y la temperatura del tributario (TTR en verde), en cambio prácticamente no se nota un efecto en el agua del río Ebro a corto plazo.

Comparando la temperatura del aire con la del tributario se puede comprobar que la temperatura del aire presenta más variabilidad que la temperatura del agua, y normalmente presenta picos más acusados (+/- 4 a 6 grados como máximo). En verano se aprecia una tendencia a temperaturas del aire superiores en 2-3°C a las del agua; esto es debido a la inercia térmica del agua.

Cabe destacar que los valores máximos tanto de temperatura del aire como de la entrada Segre+Cinca tienen lugar entre los días 200-230; en cambio el máximo de la curva de temperaturas del agua en Mequinenza presenta cierto retraso temporal, llegando a su máximo los días 250-260.

Las temperaturas del agua en Mequinenza son similares a las del agua del tributario (Segre+Cinca) a principios de año (primeros 60 días aproximadamente), después las temperaturas del Segre+Cinca van ganando calor a medida que transcurre la primavera, hasta llegar a diferencias térmicas de 8-10°C en algunos casos (periodo 180-200). Las temperaturas de ambas entradas se vuelven a semejar entre los días 230-250 y seguidamente las diferencias cambian de signo, la salida de Mequinenza presenta valores más altos de temperatura que la entrada del Segre+Cinca (llegando a diferencias de unos 6°C). Hacia finales de año estas diferencias se reducen.

Con tal de intentar minimizar los efectos de avenidas puntuales y de eventos meteorológicos se procedió a realizar un estudio de promediado de los datos superior al rango diario. Se definieron promedios de 3, 5 y 7 días respectivamente. Se trabaja con promedios semanales puesto que suavizaban considerablemente el efecto de los eventos con duración de uno a tres días pero sin perder la evolución temporal de la temperatura. Periodos superiores a los siete días harían perder la resolución de la evolución temporal de las temperaturas del agua.

En la Figura 12 los promedios semanales de las temperaturas del agua de entrada para el Ebro en Mequinenza (TIN) y la entrada del Segre (TTR).

Promedios semanales TIN TTR años 1998 y 1999

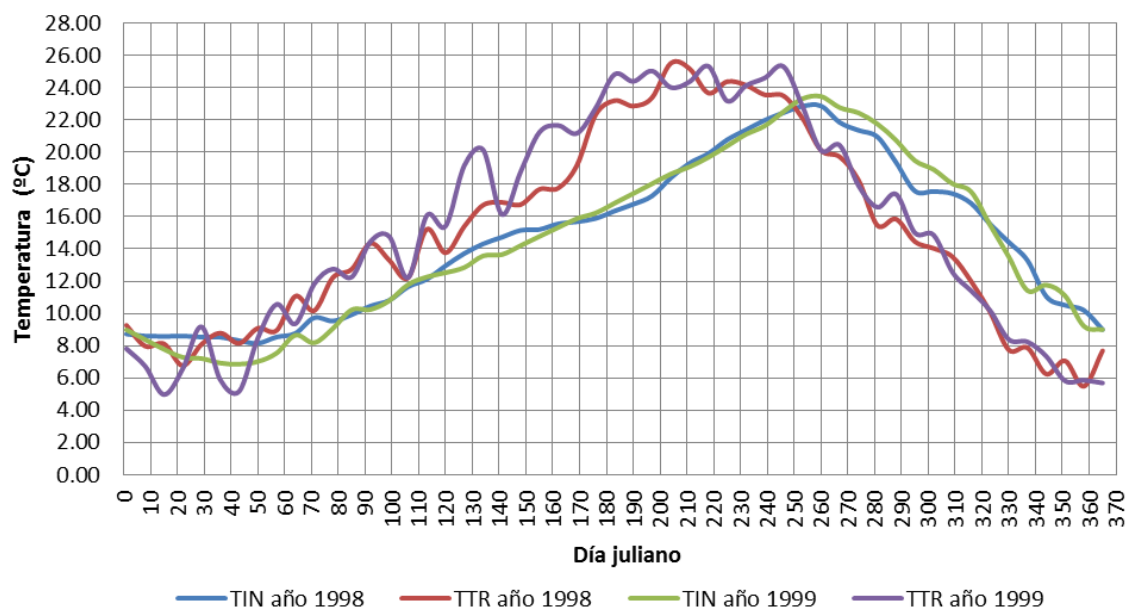


Figura 12. Promedios semanales de las temperaturas de entrada para el Ebro en Mequinenza (TIN) y la entrada del Segre (TTR).

Realizando el promedio semanal se han reducido las diferencias inducidas por fenómenos puntuales (meteorológicos o avenidas); pero aún se aprecian ciertas diferencias entre los años 1998 y 1999. El año 1999 presenta valores inferiores en la temperatura de las entradas durante los dos primeros meses del año, días julianos 10-20 y 30-50. A partir del día 60 y hasta el día 120 la tendencia es muy parecida. Entre el periodo 120-170 se pueden apreciar ciertas diferencias en las variaciones del tributario (TTR) llegando a valores de hasta 4°C (alrededor del día 210). El descenso de temperaturas es mucho más semejante entre ambos años. Con todo, se puede apreciar que las diferencias propiciadas por eventos meteorológicos puntuales se han reducido considerablemente. Mequinenza presenta una curva mucho más regular y las diferencias entre 1998 y 1999 están alrededor de 0.5°C llegando a 2-3°C en casos puntuales (alrededor de los días 130 y 160).

Finalmente se procedió a realizar la media entre los años 1998 y 1999 con tal de minimizar los efectos que tienen lugar únicamente en uno de los dos años. Los resultados de promedios semanales de las temperaturas del agua se muestran en la Figura 13.

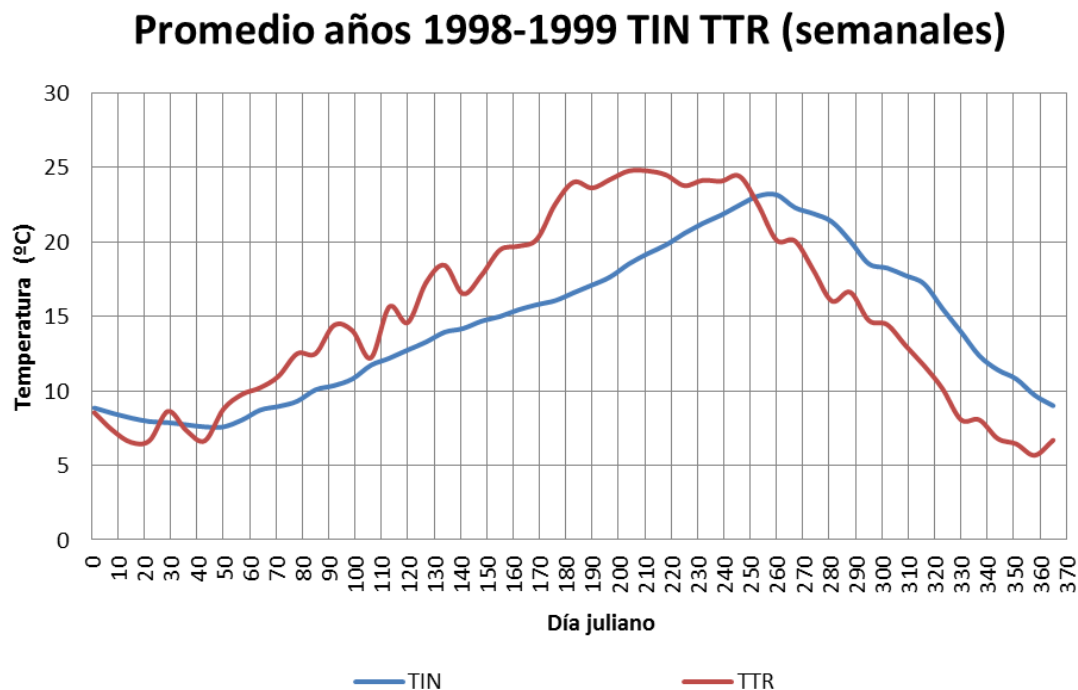


Figura 13. Promedio 1998-1999 de los promedios semanales de las temperaturas del agua. En azul se muestra la temperatura de entrada al embalse procedente del embalse de Mequinenza (TIN); en rojo la temperatura de entrada procedente del Segre (TTR).

3.1.3 Análisis de sensibilidad

Para el análisis de sensibilidad a la condición de contorno aguas arriba se han estudiado los siguientes casos.

Caso real 1998 (simulado como caso de control). Como se dispone de la serie completa de caudales de entrada/salida, temperaturas del agua y evolución meteorológica a escala diaria se procede a estudiar el año 1998 como caso real de estudio. A partir de este se realizan modificaciones para observar qué ocurre si se modifican ciertos parámetros.

Caso 1998 utilizando los promedios semanales de temperatura para la condición de contorno de entrada para la media semanal 1998. Se pretende comparar la evolución diaria del embalse con los datos de temperatura del agua promediados semanalmente.

Caso 1998 utilizando los promedios semanales de temperatura para la condición de contorno de entrada para la media 1998-1999. Se pretende comparar la evolución real del embalse con los datos de temperatura del agua de 1998 y la propuesta de la media de los años 1998 y 1999 promediados semanalmente.

Caso 1998 cambiando las condiciones de contorno de temperatura de entrada del agua por datos ficticios. Con estas simulaciones se pretende mostrar qué pasaría en caso de utilizar datos que difieran dos grados de los datos reales de temperatura del agua. Para analizar correctamente este error provocado se estudian los siguientes casos:

Disminución de 2°C a las temperaturas de entrada del agua (entradas Ebro, TIN y Segre; TTR); dejando el resto de datos igual que el caso de control.

Disminución de 2°C a las temperaturas de entrada del agua únicamente para el río Ebro (TIN); dejando el resto de datos igual que el caso de control.

Disminución de 2°C a las temperaturas de entrada del agua únicamente para el río Segre (TTR); dejando el resto de datos igual que el caso de control.

Aumento de 2°C a las temperaturas de entrada del agua (entradas Ebro, TIN y Segre; TTR); dejando el resto de datos igual que el caso de control.

Aumento de 2°C a las temperaturas de entrada del agua únicamente para el río Ebro (TIN); dejando el resto de datos igual que el caso de control.

Aumento de 2°C a las temperaturas de entrada del agua únicamente para el río Segre (TTR); dejando el resto de datos igual que el caso de control.

Todos los casos calculados se comparan con el caso de control (1).

3.1.4 Resultados y discusión del análisis de sensibilidad

Para mostrar la influencia de la condición de contorno hacia segmentos aguas abajo se ha analizado qué ocurre en dos segmentos significativos del embalse: el segmento 29

(aproximadamente en el embarcadero de Almatret a unos 15 km de la presa de Mequinenza) y en el segmento 58 (aguas arriba de la presa de Ribarroja).

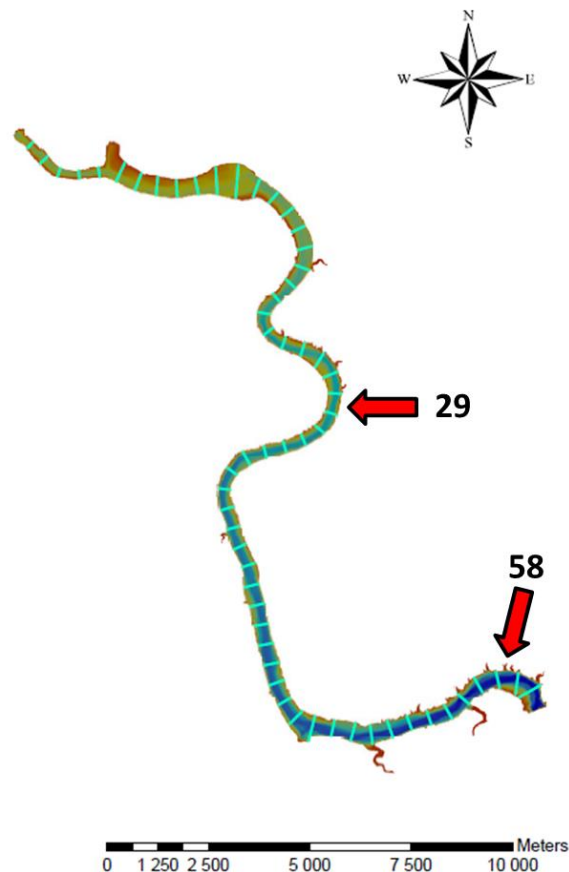


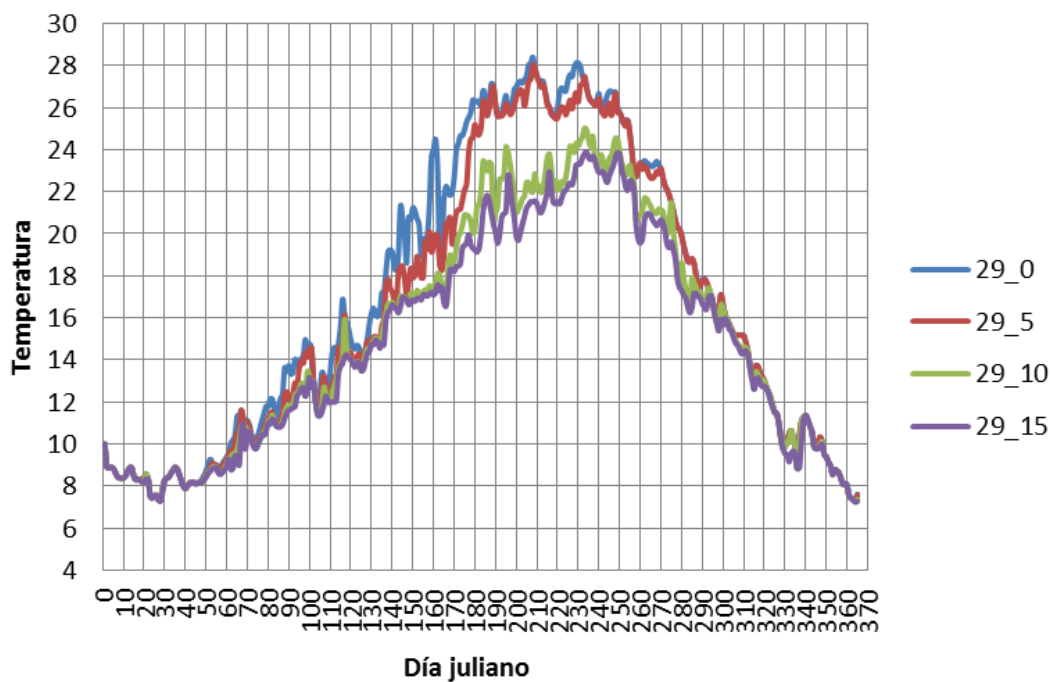
Figura 14. Localización de los segmentos 29 y 58 en el embalse de Ribarroja de Ebro.

Las gráficas de comparación de resultados que se muestran a continuación muestran la evolución temporal de la temperatura del agua a diferentes profundidades; en superficie, 5 m, 10 m y 15 m de profundidad.

3.1.4.1 CASO 1 (Control)

Caso real 1998 (simulado como caso de control). Como se dispone de la serie completa de caudales de entrada/salida, temperaturas del agua y evolución meteorológica a escala diaria se procede a estudiar el año 1998 como caso real de estudio. A partir de este se realizan modificaciones para observar qué ocurre si se modifican ciertos parámetros.

CASO 1



CASO 1

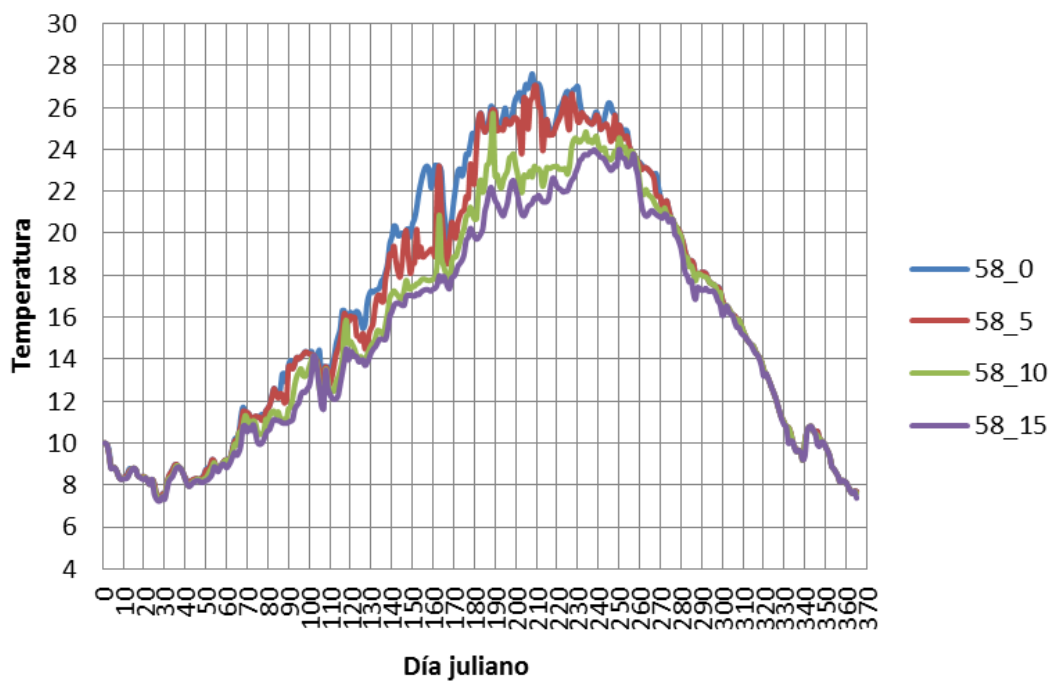


Figura 15. Evolución de temperaturas del agua en distintas profundidades para los segmentos 29 y 58; en azul la línea correspondiente a la temperatura en superficie; rojo: a 5m de profundidad; verde: a 10 m de profundidad; lila: a 15 m de profundidad. Resultados mediante CE-QUAL-W2 v.3.7.

En este caso se ha simulado la evolución del año 1998 completo, con datos promediados diariamente. La evolución de las temperaturas a distintas profundidades se puede observar

en la Figura 15. Se puede observar una total correspondencia directa de los picos con la evolución meteorológica del año 1998.

Inicialmente el perfil del agua está mezclado y se empieza a diferenciar por temperaturas a partir del tercer mes. La evolución de la superficie del agua y a 5m de profundidad son las que notan más la evolución meteorológica diaria (con cierto retraso a 5m de profundidad y mayores cambios en superficie).

Las mayores diferencias en profundidad tienen lugar entre los días 150-230; cuando el perfil vertical del embalse se va calentando paulatinamente y de manera diferenciada. Para el último tercio del año la evolución térmica del embalse se va asemejando y disminuyendo en conjunto de los 20-22°C hasta llegar a los 8-10°C a finales de diciembre.

A rasgos generales cabe destacar la similitud entre la evolución de ambos segmentos (29 y 59) aunque se aprecia un mayor suavizado en profundidad a medida que se avanza hacia aguas abajo.

3.1.4.2 CASO 2

Caso 1998 utilizando los promedios semanales de temperatura para la condición de contorno de entrada para la media semanal 1998. Se pretende comparar la evolución diaria del embalse con los datos de temperatura del agua promediados semanalmente.

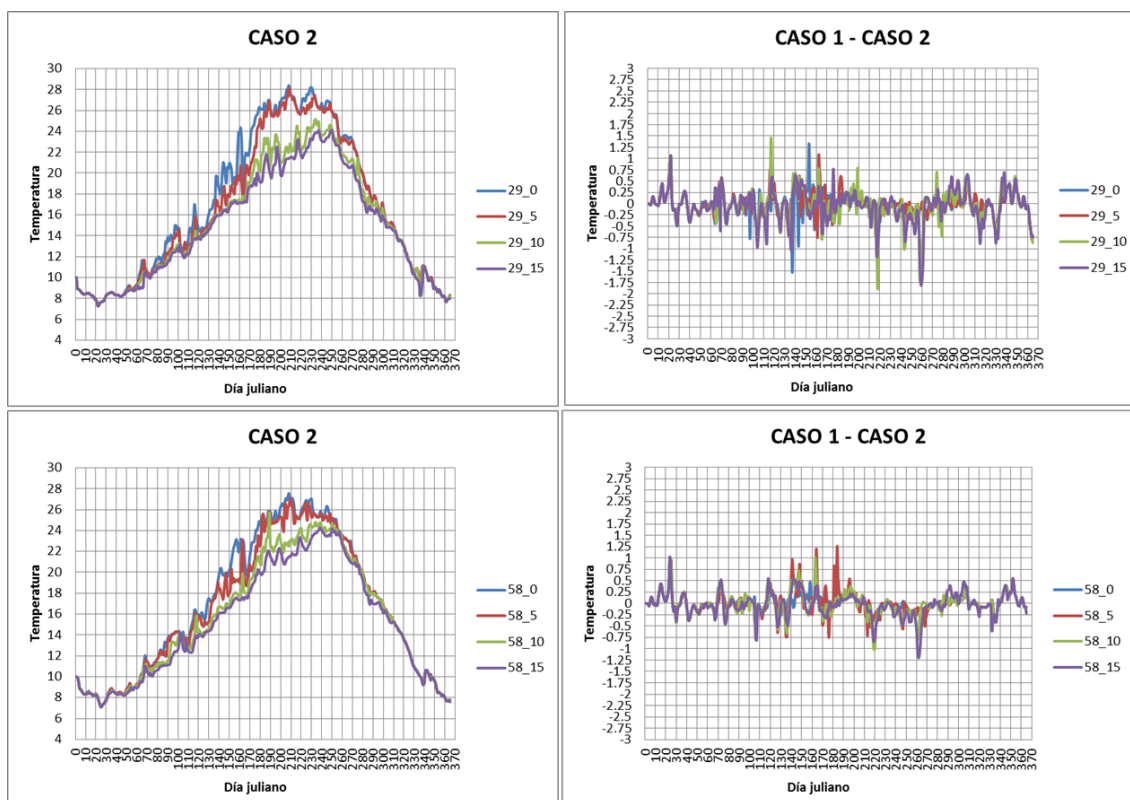


Figura 16. Izquierda: Evolución de temperaturas del agua en distintas profundidades para los segmentos 29 (arriba) y 58 (abajo). Derecha: diferencias entre el caso original (CASO 1) y la simulación del CASO 2. En azul la línea correspondiente a la temperatura en superficie; rojo: a 5m de profundidad; verde: a 10 m de profundidad; lila: a 15 m de profundidad. Resultados mediante CE-QUAL-W2 v.3.7.

En la Figura 16 se presenta la evolución térmica de los segmentos 29 y 58 a distintas profundidades para todo el año 1998. En las imágenes de la derecha se puede observar la resta entre el caso inicial (Caso 1) y el presente caso 2. Como se puede ver aunque hay picos a lo largo de todo el año las diferencias se encuentran en el orden de los 0°C .

Se observa claramente como a medida que los resultados se alejan de la condición de contorno los picos de errores puntuales son menores. Las mayores diferencias se encuentran a finales de primavera-principios de verano y como máximo son de 1.70°C (para el segmento 29) o 1.25°C para el segmento 58. Las diferencias tienen lugar en todo el perfil de temperaturas; pero según la época del año afectan a mayor o menor profundidad (según la colocación del agua en el perfil).

Los picos que se diferencian de la abscisa de 0°C de diferencia son debidos únicamente a los eventos meteorológicos puntuales; el hecho de pasar de medias diarias en temperaturas de entrada a promedio semanal hace que los eventos puntuales queden disimulados.

3.1.4.3 CASO 3

Caso 1998 utilizando los promedios semanales de temperatura para la condición de contorno de entrada para la media 1998-1999. Se pretende comparar la evolución real del embalse con los datos de temperatura del agua de 1998 y la propuesta de la media de los años 1998 y 1999 promediados semanalmente.

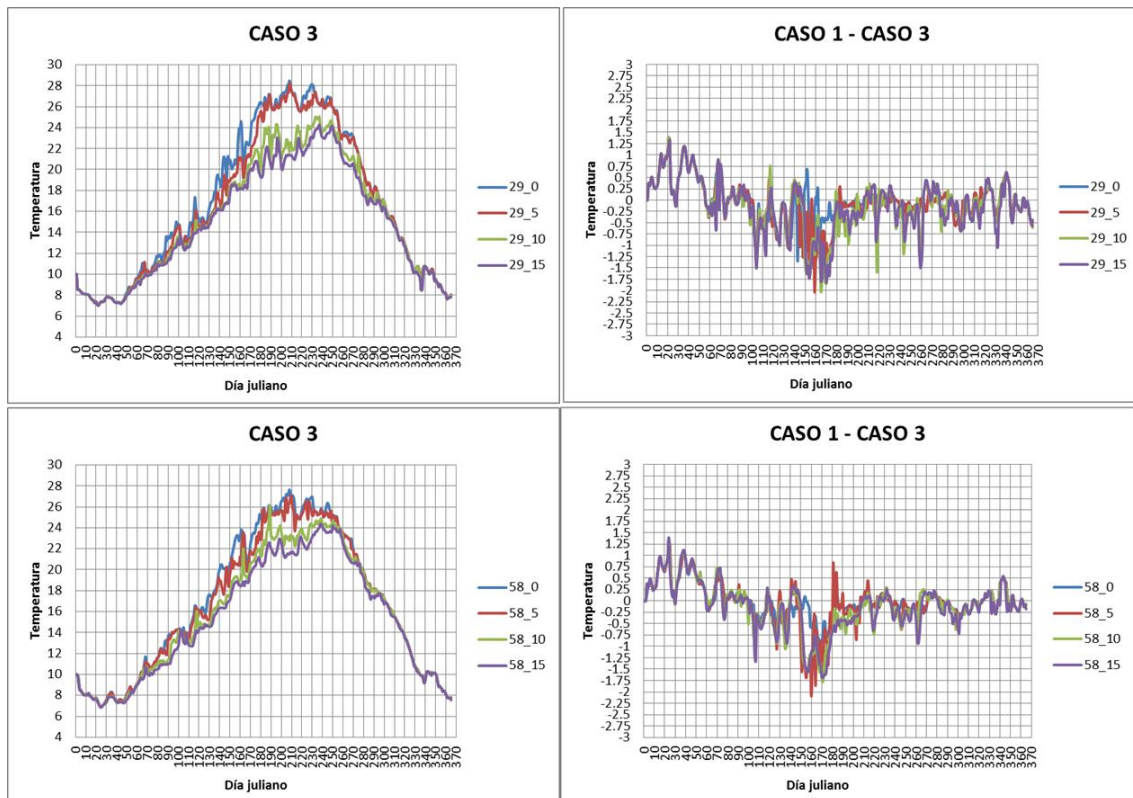


Figura 17. Izquierda: Evolución de temperaturas del agua en distintas profundidades para los segmentos 29 (arriba) y 58 (abajo). Derecha: diferencias entre el caso original (CASO 3) y la simulación del CASO 2. En azul la línea correspondiente a la temperatura en superficie; rojo: a 5m de profundidad; verde: a 10 m de profundidad; lila: a 15 m de profundidad. Resultados mediante CE-QUAL-W2 v.3.7.

En este caso se aplica el promedio 1998-1999 y se compara con el año 1998. Está claro que además de suavizar los eventos puntuales se aprecian los eventos que diferencian un año de otro. Las mayores diferencias coinciden también con las mayores diferencias de temperaturas de los años 1998-1999. Por este motivo es interesante comparar las dos figuras de la derecha de la Figura 17 con la comparación de temperaturas de entrada de la Figura 8, donde se aprecian las temperaturas de entrada por el Ebro y los tributarios tanto del año 1998 como del año 1999.

3.1.4.4 CASOS 4

Caso 1998 cambiando las condiciones de contorno de temperatura de entrada del agua por datos ficticios. Con estas simulaciones se pretende mostrar qué pasaría en caso de utilizar datos que difieran dos grados de los datos reales de temperatura del agua. Para analizar correctamente este error provocado se estudian los siguientes casos:

Disminución de 2°C a las temperaturas de entrada del agua (entradas Ebro, TIN y Segre; TTR); dejando el resto de datos igual que el caso de control.

Mediante este caso se pretende ejemplificar el efecto de un error de 2 grados negativos en ambas entradas de temperatura al embalse. Cabe suponer que si el calentamiento del agua dependiera únicamente de este factor, el agua del embalse debería encontrarse dos grados por debajo del Caso 1, pero como se observa en las imágenes de la Figura 18 no siempre es así.

Aunque se puede ver una tendencia a los 2 grados de diferencia en comparar el caso 4a con el caso 1, en algunos puntos el error se minimiza; especialmente en verano y especialmente en las capas superficiales. A principios de año no se nota demasiado el efecto del calentamiento en superficie, pero a medida que avanza la primavera se puede ver como el efecto inducido de la disminución de dos grados se ve afectado por el calentamiento superficial del agua (líneas azules en superficie y, en menor medida, líneas rojas a 5m de profundidad). Los efectos son más notorios en verano; en que ya se ve afectado todo el perfil de agua (especialmente en superficie). A finales de año cuando la radiación es menor los efectos también vuelven a ser menores y las diferencias vuelven a ser del orden de los 2°C.

Las diferencias son más exageradas en el perfil situado más aguas arriba (segmento 29) que en comparación con el situado aguas arriba de la presa de Ribarroja de Ebro (segmento 58).

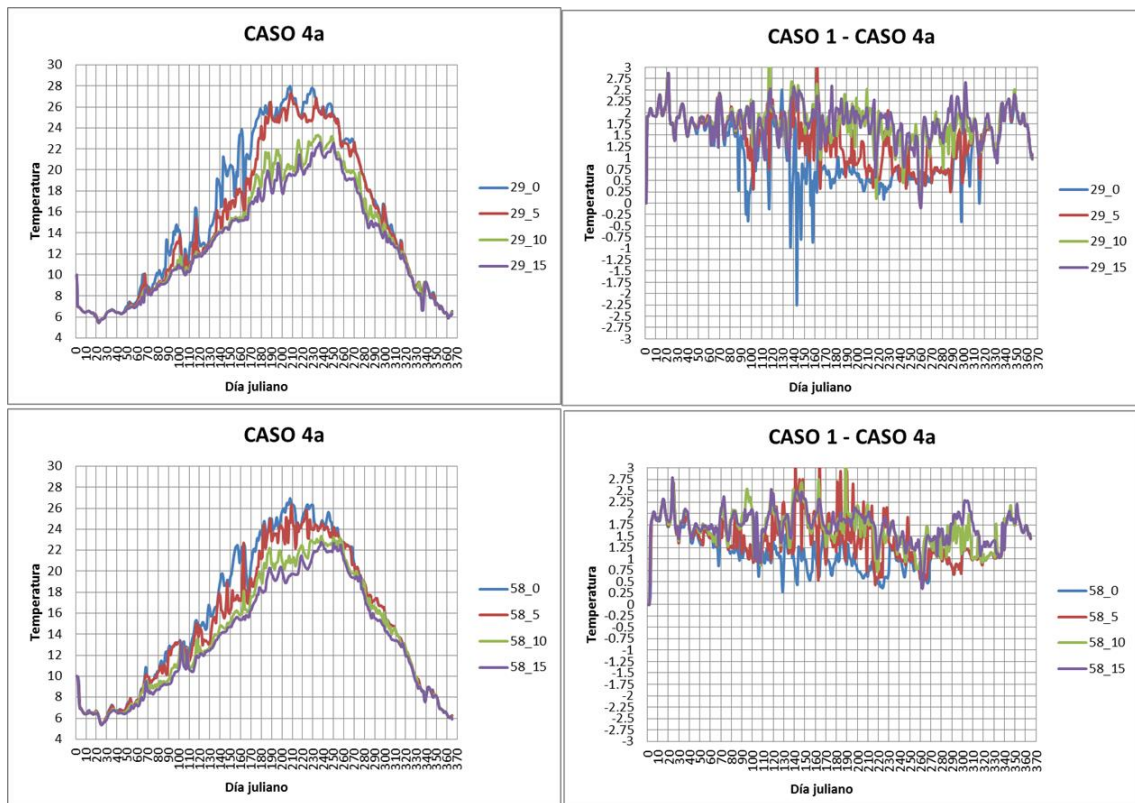


Figura 18. Izquierda: Evolución de temperaturas del agua en distintas profundidades para los segmentos 29 (arriba) y 58 (abajo). Derecha: diferencias entre el caso original (CASA 4a) y la simulación del CASO 2. En azul la línea correspondiente a la temperatura en superficie; rojo: a 5m de profundidad; verde: a 10 m de profundidad; lila: a 15 m de profundidad. Resultados mediante CE-QUAL-W2 v.3.7.

- Disminución de 2°C a las temperaturas de entrada del agua únicamente para el río Ebro (TIN); dejando el resto de datos igual que el caso de control.

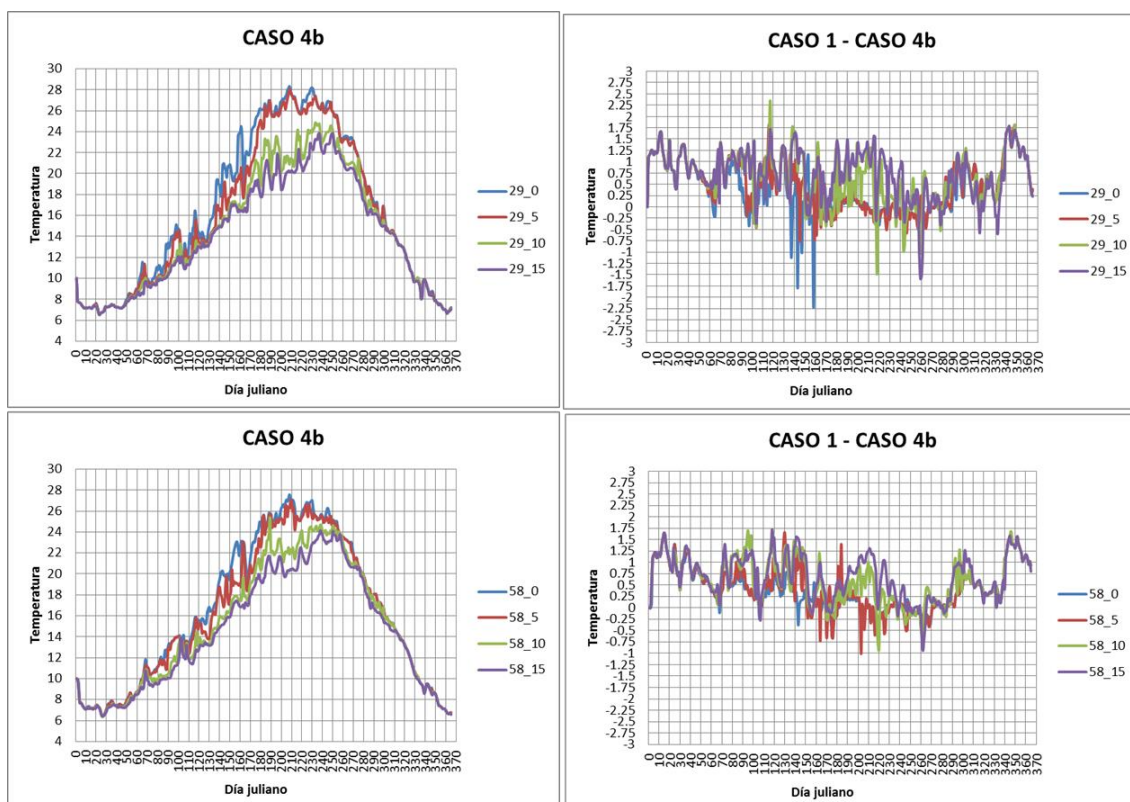


Figura 19. Izquierda: Evolución de temperaturas del agua en distintas profundidades para los segmentos 29 (arriba) y 58 (abajo). Derecha: diferencias entre el caso original (CASO 4b) y la simulación del CASO 2. En azul la línea correspondiente a la temperatura en superficie; rojo: a 5m de profundidad; verde: a 10 m de profundidad; lila: a 15 m de profundidad. Resultados mediante CE-QUAL-W2 v.3.7.

En este ejemplo se sigue aproximadamente la misma tendencia que en el caso anterior (Caso 4a), pero solo se modifican las entradas correspondientes al río Ebro. Este es un caso más excepcional puesto que las temperaturas saliente de la presa de Mequinenza son mucho más regulares que las procedentes del Tributario (Segre+Cinca) como se puede observar en la Figura 7 por ejemplo. Además las salidas por la presa de Mequinenza son muy poco dependientes de la evolución meteorológica puesto que salen de las tomas de la presa en profundidad, como se puede apreciar en las figuras de comparación de la temperatura del aire con la temperatura del agua (Figura 10 para el año 1998 y Figura 11 para el año 1999).

- Disminución de 2°C a las temperaturas de entrada del agua únicamente para el río Segre (TTR); dejando el resto de datos igual que el caso de control.

En el caso 4c se presenta el ejemplo que muestra que pasaría si hay un error de 2 grados en la temperatura del tributario (Segre+Cinca) durante todo un año. En los casos en que el caudal es más importante afecta más al perfil de temperaturas (llegando a afectar hasta 2 grados en la diferencia de temperaturas) como se puede ver en la Figura 20. Análogamente a

los dos casos anteriores se puede observar cierta mejora en verano (especialmente en superficie).

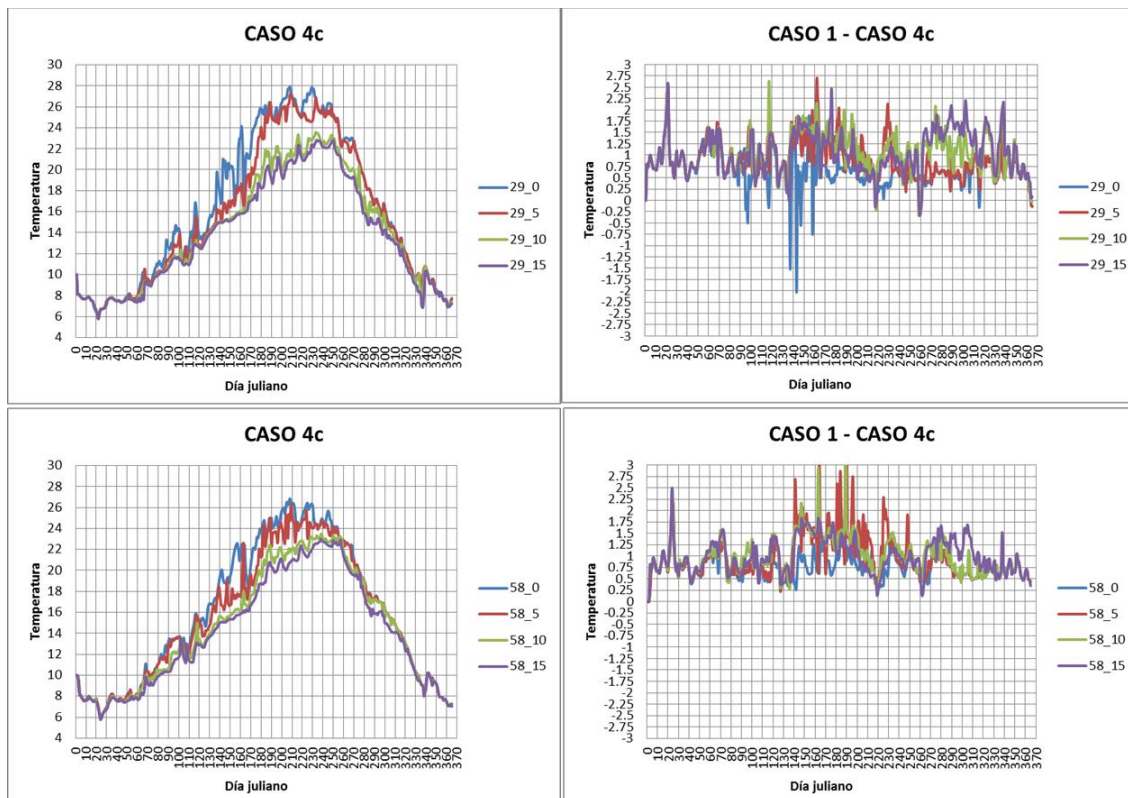


Figura 20. Izquierda: Evolución de temperaturas del agua en distintas profundidades para los segmentos 29 (arriba) y 58 (abajo). Derecha: diferencias entre el caso original (CASO 4c) y la simulación del CASO 2. En azul la línea correspondiente a la temperatura en superficie; rojo: a 5m de profundidad; verde: a 10 m de profundidad; lila: a 15 m de profundidad. Resultados mediante CE-QUAL-W2 v.3.7.

- Aumento de 2°C a las temperaturas de entrada del agua (entradas Ebro, TIN y Segre; TTR); dejando el resto de datos igual que el caso de control.

Este ejemplo es bastante similar al Caso 4a, pero a diferencia de disminuir las temperaturas de entrada se aumentan también en 2°C. El efecto tendría que ser similar pero con temperaturas mayores del agua.

Como en el caso 4a, durante los primeros meses del año ambas simulaciones difieren unos 2 grados centígrados en todo el perfil; puesto que el embalse no se encuentra estratificado y las aguas se mezclan prácticamente de manera total. A medida que el embalse se estratifica ocurren dos fenómenos; el primero es que el aumento de temperatura en superficie debido a la radiación y aumento de temperaturas de verano provoca que el error se minimiza rápidamente hasta llegar a errores del orden de los 0°C en superficie o de -0.25°C a 5 m de profundidad.

Las aguas que circulan por la parte inferior siguen con un error del orden de los 2°C. Este efecto se nota más en el caso del segmento 29, mientras que en el segmento 58 el efecto a 5m de profundidad quedaría un poco más diluido.

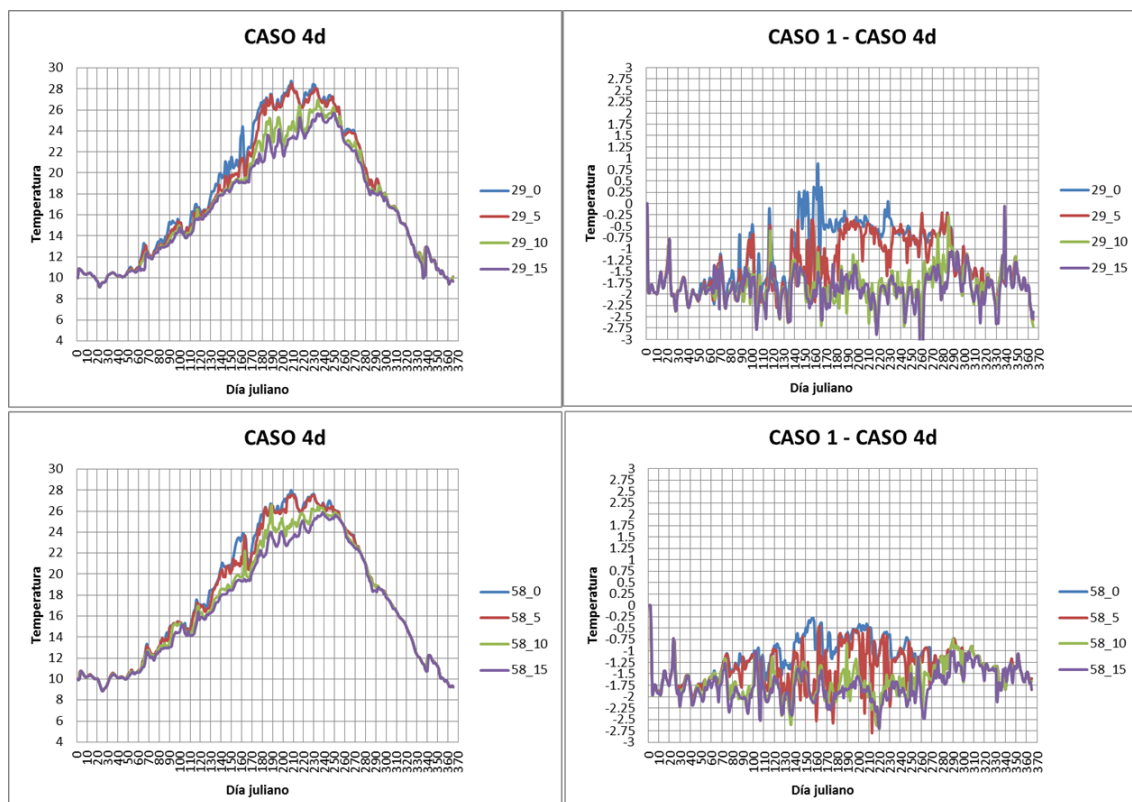


Figura 21. Izquierda: Evolución de temperaturas del agua en distintas profundidades para los segmentos 29 (arriba) y 58 (abajo). Derecha: diferencias entre el caso original (CASO 4d) y la simulación del CASO 2. En azul la línea correspondiente a la temperatura en superficie; rojo: a 5m de profundidad; verde: a 10 m de profundidad; lila: a 15 m de profundidad. Resultados mediante CE-QUAL-W2 v.3.7.

- Aumento de 2°C a las temperaturas de entrada del agua únicamente para el río Ebro (TIN); dejando el resto de datos igual que el caso de control.

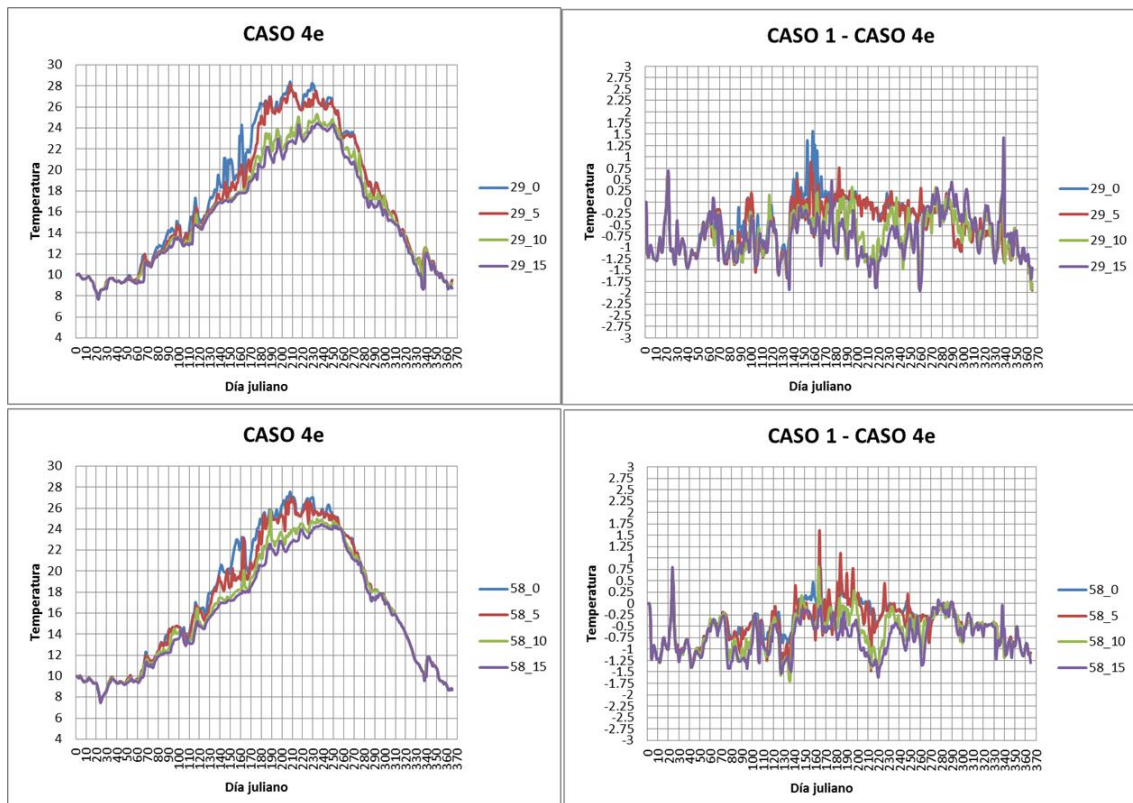


Figura 22. Izquierda: Evolución de temperaturas del agua en distintas profundidades para los segmentos 29 (arriba) y 58 (abajo). Derecha: diferencias entre el caso original (CASA 4e) y la simulación del CASO 2. En azul la línea correspondiente a la temperatura en superficie; rojo: a 5 m de profundidad; verde: a 10 m de profundidad; lila: a 15 m de profundidad. Resultados mediante CE-QUAL-W2 v.3.7.

- Aumento de 2°C a las temperaturas de entrada del agua únicamente para el río Segre (TTR); dejando el resto de datos igual que el caso de control.

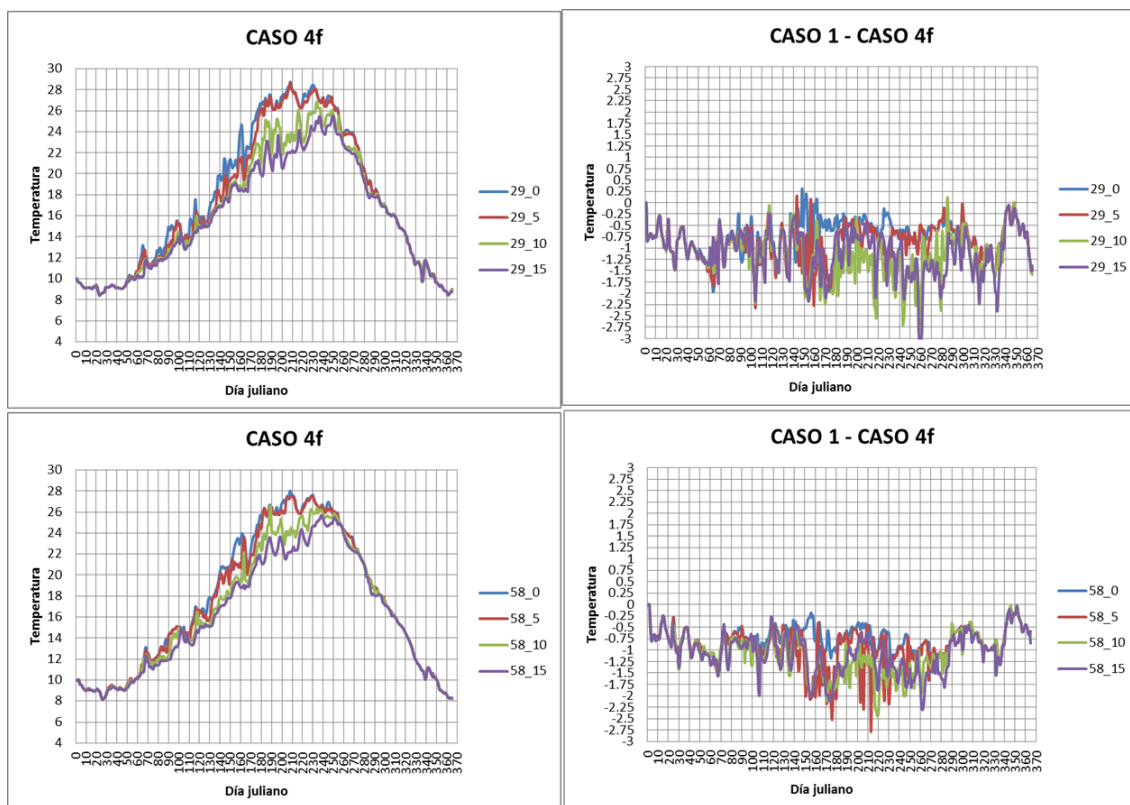


Figura 23. Izquierda: Evolución de temperaturas del agua en distintas profundidades para los segmentos 29 (arriba) y 58 (abajo). Derecha: diferencias entre el caso original (CASO 4f) y la simulación del CASO 2. En azul la línea correspondiente a la temperatura en superficie; rojo: a 5m de profundidad; verde: a 10 m de profundidad; lila: a 15 m de profundidad. Resultados mediante CE-QUAL-W2 v.3.7.

Las magnitudes de error total para cada caso de estudio se resumen en la Tabla 1; se destaca que los errores negativos significan que se obtendrían temperaturas superiores en el caso de estudio comparadas con el caso original de 1998; valores positivos indicarían diferencias positivas por lo que el caso inicial tendría temperaturas superiores a los de comparación.

Es importante destacar que en error medio los casos 4a y 4d no llegan al error introducido de 2°C en la temperatura de entrada, si no que quedan minimizados alrededor de +/- 1.1 a 1.8°C; esto se debe a la autocorrección con las variables meteorológicas. Análogamente y en menor medida (en función del caudal de cada caso) ocurre con los casos b, c, e y f.

También se debe destacar que si las diferencias introducidas son bajando la temperatura el error absoluto es menor que en el caso de aumentar la temperatura. En el caso de disminuir la temperatura el calentamiento del agua en superficie debido a la llegada de la primavera y el verano hace que en las capas más superficiales se corrija el error. En el caso de

aumentar la temperatura (casos 4 d, e y f) el calentamiento superficial del agua se suma al error positivo de la temperatura del agua.

	29_0	29_5	29_10	29_15	58_0	58_5	58_10	58_15
CASO 2	-0.014	-0.003	-0.036	-0.055	0.016	0.013	-0.006	-0.028
CASO 3	-0.019	-0.073	-0.130	-0.141	0.010	-0.052	-0.097	-0.123
CASO 4a	1.120	1.435	1.746	1.768	1.161	1.423	1.646	1.719
CASO 4b	0.415	0.495	0.651	0.726	0.400	0.436	0.596	0.685
CASO 4c	0.679	0.900	1.061	1.054	0.751	0.947	0.996	0.996
CASO 4d	-1.192	-1.402	-1.807	-1.873	-1.152	-1.368	-1.625	-1.745
CASO 4e	-0.481	-0.549	-0.720	-0.758	-0.407	-0.466	-0.615	-0.734
CASO 4f	-0.742	-0.885	-1.132	-1.103	-0.736	-0.922	-1.062	-1.050

Tabla 1. Tabla de errores para las simulaciones realizadas en el análisis de sensibilidad.

3.2 Conclusiones

En cuanto a la utilización de la media 1998-1999 de la evolución de temperaturas del agua promediada semanalmente se puede observar lo siguiente:

- Las temperaturas de entrada por el cauce del río Ebro, correspondientes a las salidas del embalse de Mequinenza siguen una evolución muy parecida en los años 1998-1999.
- Las tendencias y la evolución térmica de los promedios semanales del río Segre son similares pero presentan algunas diferencias de varios grados centígrados en algunos puntos; la Tabla 1 recoge las diferencias entre 1998-1999. Las diferencias se concentran en invierno-primavera de ambos años y pueden llegar a ser de varios grados.
- En el análisis de sensibilidad realizado se ha podido observar la disminución del efecto de la condición de contorno aguas arriba a medida que se propaga hacia aguas abajo.
- En caso de utilizar temperaturas del agua de entrada 2 grados inferiores a las reales provoca una disminución de temperaturas que se propaga aguas abajo; cabe destacar que esta propagación no es de la misma magnitud en toda la

columna de agua. Las diferencias más importantes dependen del posicionamiento del agua circulante según su temperatura y densidad.

- Las principales diferencias de temperatura debidas a un evento meteorológico se ven suavizadas cuando se realiza el promedio semanal de la condición de contorno aguas arriba. Además, las principales diferencias entre los años 1998-1999 (concentradas en el periodo de primavera) se ven disminuidas en calcular el promedio entre ambos.
- En caso de cometer un error en las temperaturas de entrada al embalse es mejor que sea infravalorando las temperaturas puesto que en verano la temperatura (especialmente la de las capas superficiales) se autocorriga y calienta debido a la radiación solar y el contacto con la temperatura del aire.
- Con todo, se puede considerar que utilizar el promedio 1998-1999 de las temperaturas del agua promediadas semanalmente aporta una calidad de datos histórica, de los datos de entrada y un error pequeño en comparación con el caso real de 1998. Por lo tanto se considera oportuno utilizar el promedio 1998-1999 de datos semanales para futuras simulaciones de otros años.

3.3 Referencias bibliográficas

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" Tesis doctoral. ETSECCPB - Universitat Politècnica de Catalunya.

Anejo 4 Análisis y modelización numérica bidimensional de la dinámica del sedimento en Ribarroja de Ebro

4.1 Introducción

En este capítulo se presenta la obtención de las batimetrías de precisión correspondientes al Caso 1: el embalse de Ribarroja en el río Ebro (apartado 4.2). Como se ha venido anunciando en los capítulos anteriores, la cola del embalse tiene especial interés por ser también la confluencia de los ríos Ebro y Segre. El río Segre aporta gran cantidad de sedimentos en suspensión en la cola del embalse de Ribarroja, que ha ido modificando la batimetría de fondo desde la construcción de la presa. Por ello se realizó un estudio batimétrico de precisión en el año 2007 (Dolz *et al.*, 2009). Se consideró de especial interés comparar la batimetría del año 2007 con la de cubicación del embalse (De Pourcq *et al.*, 2007), así como analizar la evolución batimétrica de la zona mediante el análisis de dos batimetrías realizadas en los años 2007 y 2008 (Apartado 4.3), a fin de conocer el funcionamiento hidrodinámico de la zona de la cola del embalse, donde el Segre confluye con el Ebro. También se consideró necesario ampliar la batimetría para el tramo final del río Segre en dicha zona (Apartado 4.2.7). Posteriormente, los datos de estos modelos digitales del terreno también sirvieron para calibrar el módulo de transporte de sedimentos en suspensión (apartado 4.4) del modelo Iber (Bladé *et al.*, 2014) y se aplicó al estudio del diseño de un espigón en la población de Mequinenza, entre otros. Estas batimetrías se utilizaron para generar las mallas de cálculo de los modelos numéricos.

En el caso del embalse de Sau (Caso 2), se utilizó un modelo digital del terreno generado a partir de las curvas de nivel proporcionadas por la administración de la cuenca (Arbat-Bofill *et al.*, 2011). Tal y como mencionan Armengol *et al.*, 1999, el río Ter entra al embalse con gran cantidad de material en suspensión que poco a poco va sedimentando; con lo cual, también disminuye en dirección a la presa. Hablar de un patrón de distribución temporal y espacial de los sólidos en suspensión en el embalse de Sau, resulta complejo, debido a su gran variabilidad tanto espacial como temporal, consecuencia de sus distintos orígenes y naturalezas. De igual modo, las fluctuaciones en el nivel del embalse y los aportes del río en forma de avenidas del río, aumentan la tasa de erosión de los márgenes del embalse y con ello la concentración de sólidos en suspensión (Thornton *et al.*, 1990).

4.2 Caso 1: Batimetrías

4.2.1 Motivación del estudio

Con la intención de seguir estudiando la dinámica sedimentaria del embalse de Ribarroja en el río Ebro (Dolz *et al.*, 2009; Roura, 2004), en 2007 el Instituto de Investigación Flumen realizó una campaña batimétrica de precisión mediante una sonda multihaz (Apartado 4.2.2) y a partir de ella se obtuvo el modelo digital detallado del fondo del embalse (Apartado 4.2.3). Un año después se realizó una nueva batimetría de los primeros 10 kilómetros del embalse, correspondiente a la zona de confluencia del Segre con el Ebro (Apartado 4.2.4). La intención de este estudio fue comparar ambas batimetrías para observar la evolución del fondo del tercio aguas arriba del embalse de Ribarroja de Ebro durante el tiempo comprendido entre ambas batimetrías y el efecto de las avenidas sobre los sedimentos, su movilización y su distribución en el espacio (Apartado 4.3).

A posteriori, también se realizó una campaña batimétrica para conocer el tramo final del río Segre, justo antes de su confluencia con el río Ebro (Apartado 4.2.6) obteniendo el modelo digital completo del embalse de Ribarroja y el tramo final del río Segre (Apartado 4.2.7).

4.2.2 Campaña batimétrica 2007

La campaña batimétrica de campo se inició el 28 de octubre de 2007 y se terminó a mediados de noviembre del mismo año (Flumen & Casanovas-Bergé Topógrafos Asociados, 2008).

4.2.2.1 Metodología

Los trabajos para la obtención de la elevación del fondo del embalse se realizaron mediante dos ecosondas (multi y monohaz de doble frecuencia) instaladas en una barca con posicionamiento DGPS en tiempo real (Figura 24 y Figura 25). Para la toma de datos y la planificación de las trayectorias de navegación se utilizó el software de hidrografía SEXTANT (Flumen & Casanovas-Bergé Topógrafos Asociados, 2008). Debido a la utilización de las bases topográficas del ICC, se utilizó el sistema de coordenadas UTM ED50.



Figura 24. Sensor GPS instalado en la barca de navegación.



Figura 25. Ecosonda multihaz instalada en la embarcación. Campaña batimétrica 2007.

La barca siguió la trayectoria definida por las *waylines* (perfiles definidos por el usuario e introducidas previamente en el programa SEXTANT®) específicas para cada tramo. Se calibró la ecosonda, se realizaron las comprobaciones pertinentes y se realizaron los perfiles programados en la navegación. El mismo programa SEXTANT® dispone de un sistema de control de señal de satélite, y a medida que toma los datos también dispone de un filtro y control de calidad de los datos y lecturas de la sonda. Posteriormente se procedió al almacenamiento de datos.

El resultado de todas las medidas realizadas a lo largo de la campaña proporcionó una nube irregular de puntos brutos (De Pourcq *et al.*, 2007; Flumen & Casanovas-Bergé Topógrafos Asociados, 2008). Posteriormente, el postproceso consistió en tratar esta nube de puntos, filtrar los errores y obtener una malla regular de puntos fácilmente tratable con programas de cálculo y transformarlos a un formato de intercambio de información estándar ASCII.

4.2.2.2 Campaña batimétrica

Para la obtención de la batimetría del fondo del embalse, se realizaron perfiles transversales y longitudinales al río. De acuerdo con las exigencias y las características geométricas de cada zona, el embalse se dividió en tres tramos (Figura 26):

Zona 1 (Figura 26): desde el puente de Mequinenza sobre el río Segre, a lo largo de 10 km hacia aguas abajo. Debido a que es la zona de mayor interés, se utilizó la ecosonda multihaz para tener más detalle de la batimetría.

Zona 2 (Figura 26): desde el final de la zona 1 hasta 10 km aguas abajo. Mediante la sonda monohaz se obtuvieron perfiles transversales al eje del río a cada 25 m, tomando lecturas en intervalos de 2 m; también se realizaron cinco perfiles longitudinales al río.

Zona 3 (Figura 26): desde el final de la zona 2 hasta la presa de Ribarroja. Se realizaron perfiles transversales al río cada 100 m y algunos perfiles longitudinales.

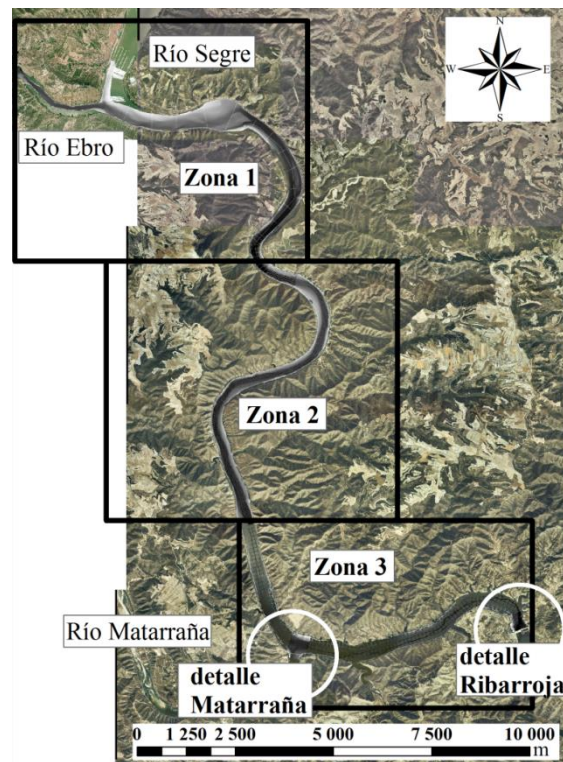


Figura 26. Subdivisión del embalse de Ribarroja por zonas de estudio: zona 1 (confluencia con el río Segre), zona 2 y zona 3. Las dos circunferencias blancas muestran dos áreas de detalle correspondientes a la entrada del río Matarraña y la zona próxima a la presa de Ribarroja.

Además de estas tres zonas se consideró necesario determinar dos áreas de estudio más detallado dentro de la zona 3 (Figura 26): los tramos correspondientes a la entrada del río Matarraña al río Ebro y la zona más próxima a la presa. En estos tramos se densificó la toma de datos (perfiles transversales con sonda monohaz cada 10 m) para ver con detalle el comportamiento de los sedimentos en la confluencia Matarraña-Ebro y frente a las tomas de la presa.

Para la zona 1 (Figura 26) se obtuvo una malla de puntos de 2 x 2 m, para la zona 2 se obtuvo una malla en formato raster de 25 x 2 m, y para la zona 3 el hecho de disponer de perfiles cada 100 m hizo imposible generar una malla regular de gran precisión por lo que inicialmente se estudiaron los perfiles individualmente. Para las dos áreas de detalles del tercer tramo (río Matarraña y presa de Ribarroja) se dispone también de una malla de 2 x 2 m.

4.2.3 Modelo digital del terreno del Embalse de Ribarroja de Ebro

A partir de los datos proporcionados por la campaña batimétrica del fondo del embalse se generó mediante ArcGIS® un modelo digital del terreno del fondo del embalse para las zonas 1 y 2 (Figura 27), la confluencia del Ebro con el Matarraña y las proximidades de la presa (el resultado final se puede ver en la Figura 28). Para el tratamiento de datos se utilizaron los formatos raster y TIN en función de los requerimientos del estudio.

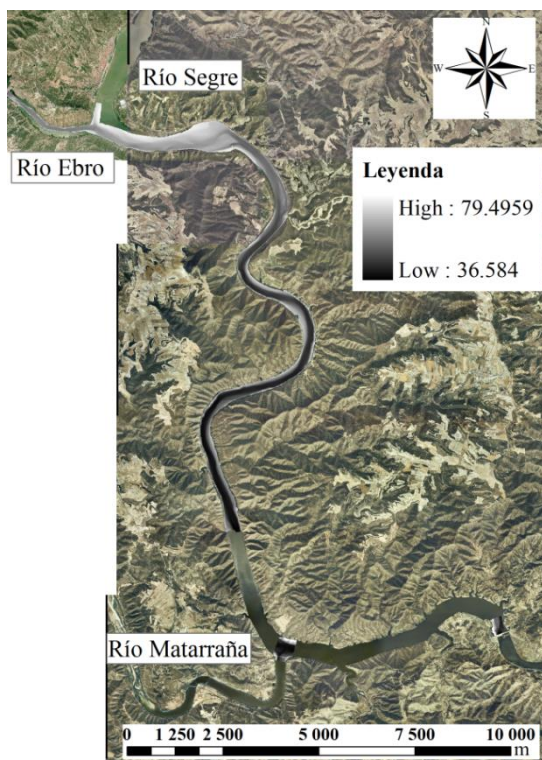


Figura 27. Modelo digital del terreno del embalse de Ribarroja de Ebro (campaña de 2007). Zonas 1, 2 y áreas de la entrada del río M-tarraña y las cercanías de la presa de Ribarroja.

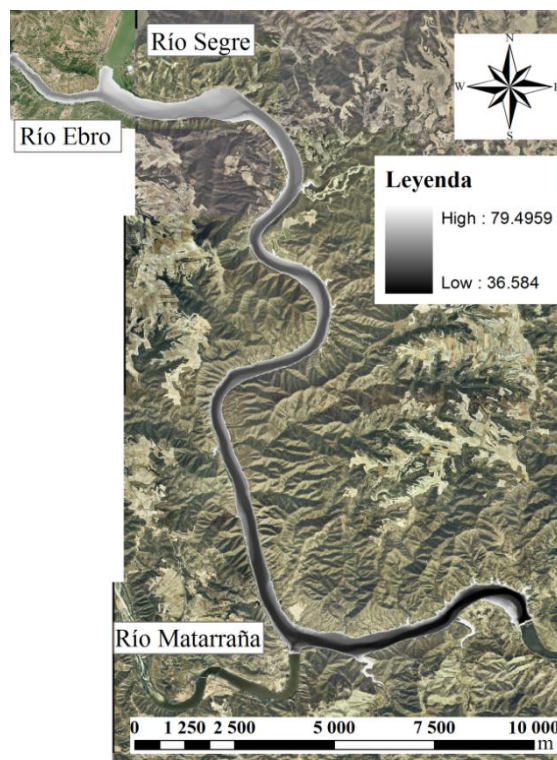


Figura 28. Modelo digital del terreno del fondo del embalse de Ribarroja de Ebro (campaña de 2007).

4.2.3.1 Mejora y ampliación

El modelo digital del terreno del embalse presentaba una serie de irregularidades en la elevación de algunas zonas, correspondientes mayormente a la presencia de árboles y otros artefactos. Estas irregularidades fueron corregidos de manera semi-automatizada mediante ArcMap® de ESRI® y también manualmente.

Para obtener un modelo digital del terreno homogéneo del fondo del embalse, se decidió generar una TIN (*Triangule Irregular Network*) interpolada de la zona 3, no obstante, la calidad de la zona 3 sería inferior a la de las zonas superiores.

Después de obtener el fondo del embalse se procedió a ajustar la batimetría a la lámina de agua. Debido a las dificultades que se presentaron en la navegación por zonas poco profundas del embalse (próximas a las márgenes), no se disponía de suficiente información batimétrica en algunos tramos laterales del río. Para ampliar estos tramos sin información, se generó dicha batimetría interpolando a partir de los límites del contorno de la batimetría con las curvas de nivel disponibles de la topografía del entorno del embalse. Esta información se obtuvo en formato digital del ICC y del el SITAR. Finalmente, se obtuvo un modelo digital del terreno del embalse, de gran calidad y resolución (Figura 29).

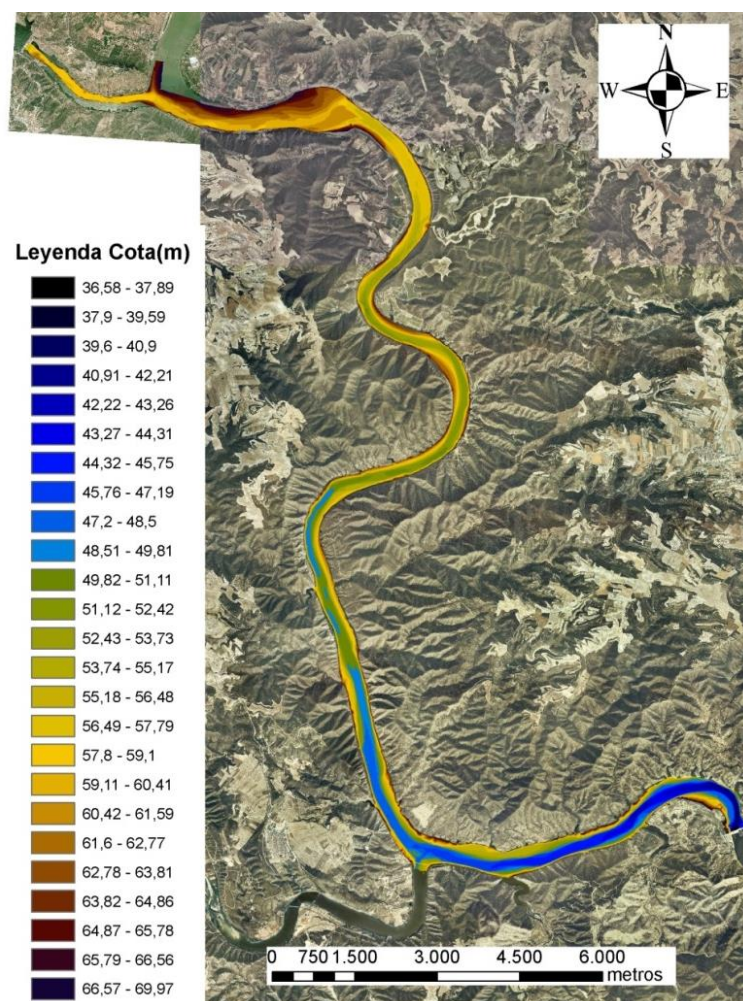


Figura 29. Modelo digital del terreno del embalse de Ribarroja de Ebro (campana 2007).

4.2.3.2 Análisis

ArcGIS® permite calcular el volumen que se encuentra entre un plano horizontal a una cota determinada y el modelo digital del terreno, así como el área de este plano horizontal. Este volumen correspondería al volumen de agua almacenada en función de la elevación de la lámina de agua, por lo que de ésta forma, se calcularon las áreas mojadas (2D y 3D) y se cubicaron los volúmenes de agua correspondientes a distintas elevaciones para el modelo digital del terreno del embalse correspondiente a la batimetría del año 2007. La Figura 30 muestra el volumen almacenado en función de la cota y el la Figura 31 se compara con la curva teórica de Varela (Varela *et al.*, 1986). Cabe destacar que en este cálculo no se consideraron las zonas de embalse correspondientes a los cauces del río Matarraña y del río Segre, por lo que el volumen determinado de embalse es inferior al real.

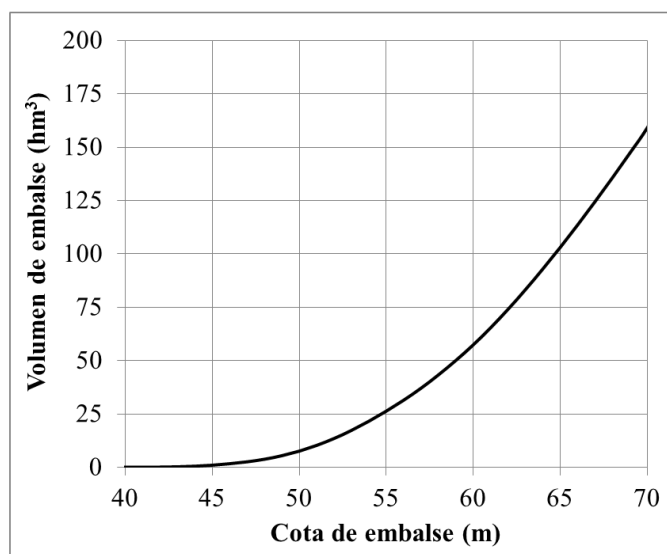


Figura 30. Curva elevaciones-capacidades del embalse de Ribarroja de Ebro.

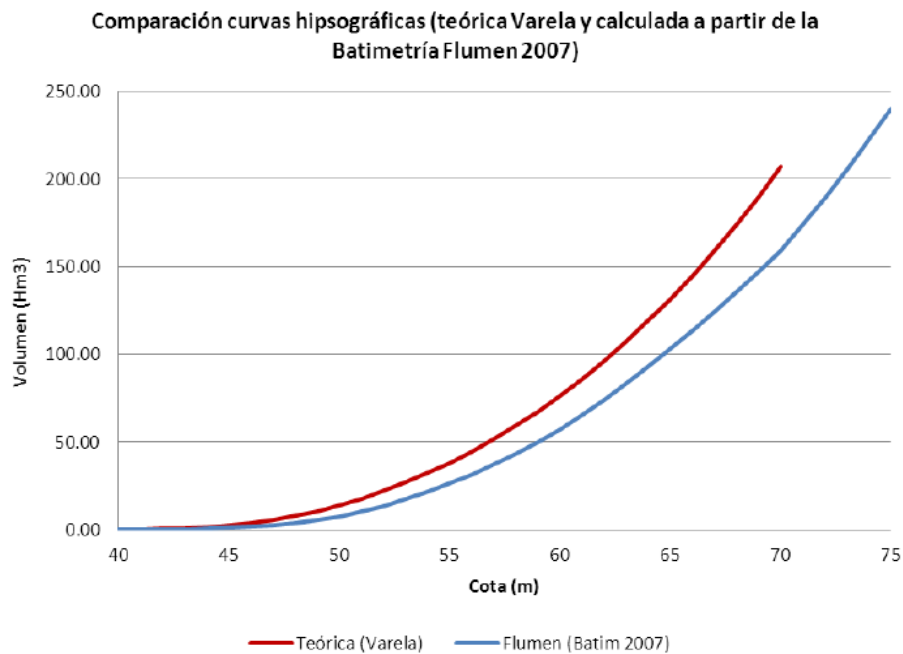


Figura 31. Comparación de las curvas elevaciones-capacidades del embalse de Ribarroja de Ebro. Curva a partir del volumen embalsado mediante la cubicación teórica de Varela (Varela et al., 1986) en rojo y la calculada con el modelo digital de 2007.

4.2.4 Campaña batimétrica 2008

Este trabajo se llevó a cabo análogamente a la anterior campaña batimétrica realizada en el año 2007 (Flumen & Casanovas-Bergé Topógrafos Asociados, 2008). Aunque la batimetría del año 2007 se realizó para todo el embalse, en el año 2008 sólo se estudió el primer tercio aguas arriba: desde la confluencia de los ríos Ebro-Segre hasta unos cinco kilómetros aguas abajo (Arbat-Bofill *et al.*, 2010c). El trabajo se llevó a cabo entre los días 3 y 5 de diciembre de 2008, aproximadamente un año después de la batimetría 2007 (Apartado 4.2.2).

4.2.4.1 Metodología

En esta campaña batimétrica únicamente se utilizó la sonda multihaz. Se realizó un perfil longitudinal siguiendo el eje del río y una serie de perfiles transversales a dicho eje, que se pueden observar en la Figura 32 (sombra en negro).

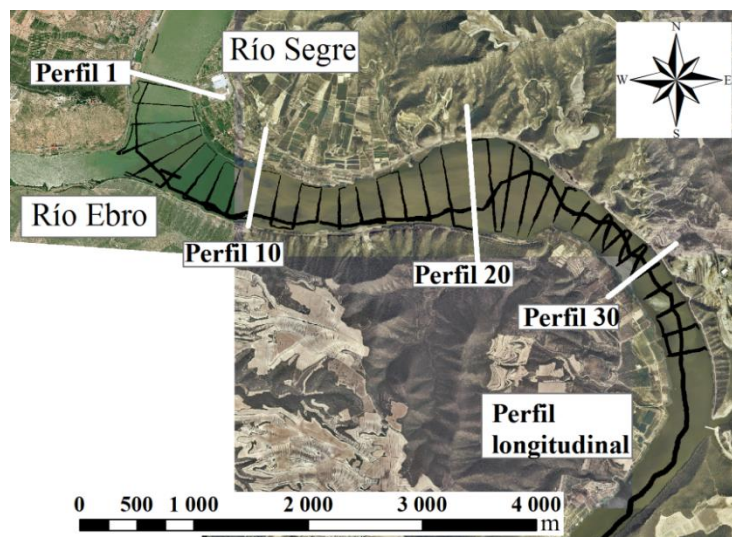


Figura 32. Perfiles longitudinales y transversales realizados en la campaña batimétrica de 2008.

4.2.5 Modelo digital del terreno del tercio superior del embalse

Se disponía de un fichero con la nube de puntos XYZ de la batimetría obtenida a partir de la campaña realizada en diciembre de 2008 con una ecosonda multihaz. La información de este fichero se transformó a un formato ASCII; a partir de éste, se realizó una rasterización (con un tamaño de celda de 2x2 m) mediante el programa ArcMap® de ESRI® (Figura 33).

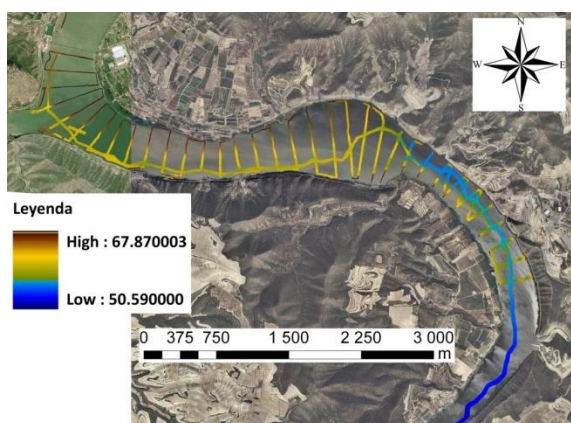


Figura 33. Rasterización de la batimetría (perfiles transversales y perfil longitudinal del eje del río).

4.2.6 Campaña batimétrica 2009

4.2.6.1 Metodología

El trabajo consistió en realizar la batimetría del río Segre justo antes de su confluencia con el río Ebro, en el ámbito de la población de Mequinenza. Los trabajos batimétricos del fondo del río Segre se realizaron mediante la combinación de una ecosonda monohaz de doble frecuencia y otra sonda multihaz para las zonas que requerían más detalle, en concreto zonas en las que se produce de recirculación del flujo.



Figura 34. Perfiles transversales de la zona de estudio (campaña 2008).

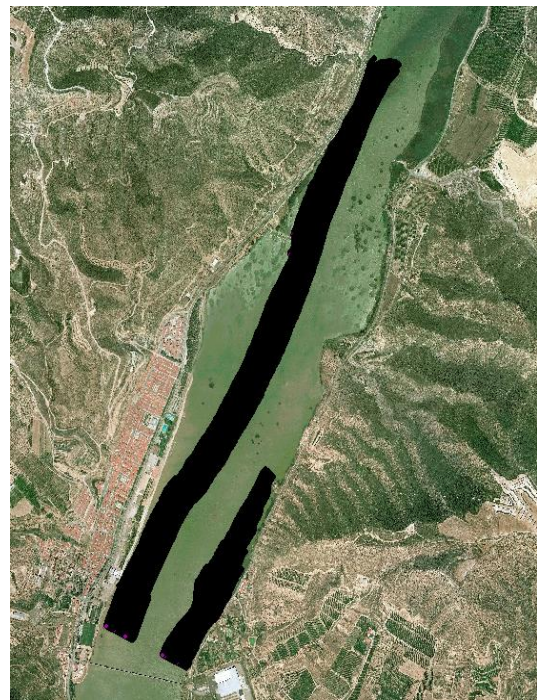


Figura 35. Localización de la batimetría obtenida con sonda multihaz (campaña 2008).

Para la obtención de la batimetría se realizaron varios perfiles transversales al río de la zona de estudio, mediante la ecosonda monohaz (Figura 34). Posteriormente, para mostrar en detalle la zona de recirculación del agua, se obtuvo la batimetría con una sonda multihaz, que se centró en el cauce principal del río (Figura 35). Finalmente, se unieron las dos batimetrías y se depuraron los datos erróneos; obteniendo una malla de puntos regular de 5 x 5 m y de 1 x 1 m en la zona de más detalle del canal.

4.2.7 Modelo digital del terreno del río Segre en el entorno de Mequinenza (2009)

En 2009 se procedió a estudiar el tramo final del río Segre unos 2.5 kilómetros aguas arriba de la confluencia con el Ebro. Las batimetrías 2007 (cOmpleta del embalse) y la del Segre (2009) se unieron para formar una sola batimetría de la zona del embalse y la confluencia Ebro-Segre (apartado 4.2.7.1).

4.2.7.1 Unión con la batimetría ya existente del embalse de Ribarroja

A partir del mapa de puntos correspondiente a la Figura 36, mediante el programa ArcGIS 9.1© se procedió a realizar un ráster regular de tamaño de celda 2 x 2m (Figura 36).

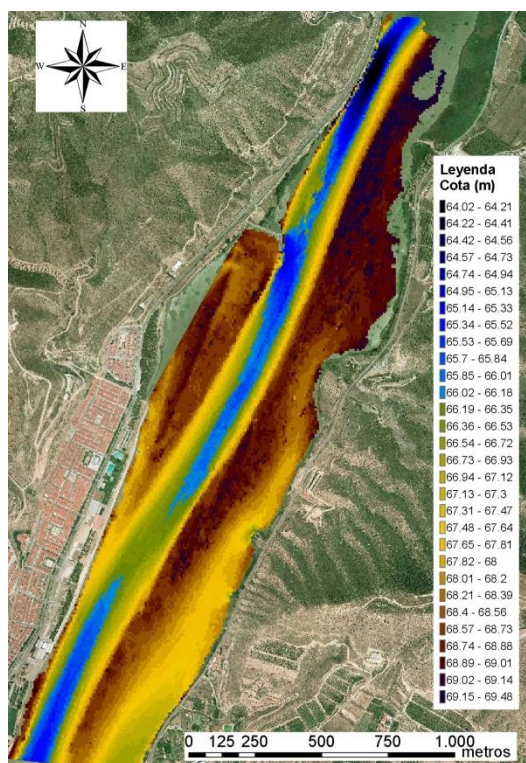


Figura 36. Rasterización de la batimetría realizada en el año 2008 (perfiles transversales y perfil longitudinal del eje del río).

A continuación se eliminó la información correspondiente a las pilas del puente de Mequinenza y se complementó con la Batimetría del año 2007 (Figura 29) y la del año 2009 (tramo del río Segre hasta el puente de Mequinenza sobre el Segre, Figura 36). En el contacto entre las dos batimetrías se interpoló linealmente la información de los dos modelos digitales del terreno. En las zonas dónde se consideró necesario ampliar el modelo digital del terreno hasta las márgenes del río, se realizó una interpolación lineal con las curvas topográficas del

terreno obtenidas de del SITAR y del ICC y se recortó la batimetría siguiendo la lámina de agua para una cota determinada. El resultado final de la unión entre batimetrías se puede ver en la Figura 37, para el tercio aguas arriba del embalse.

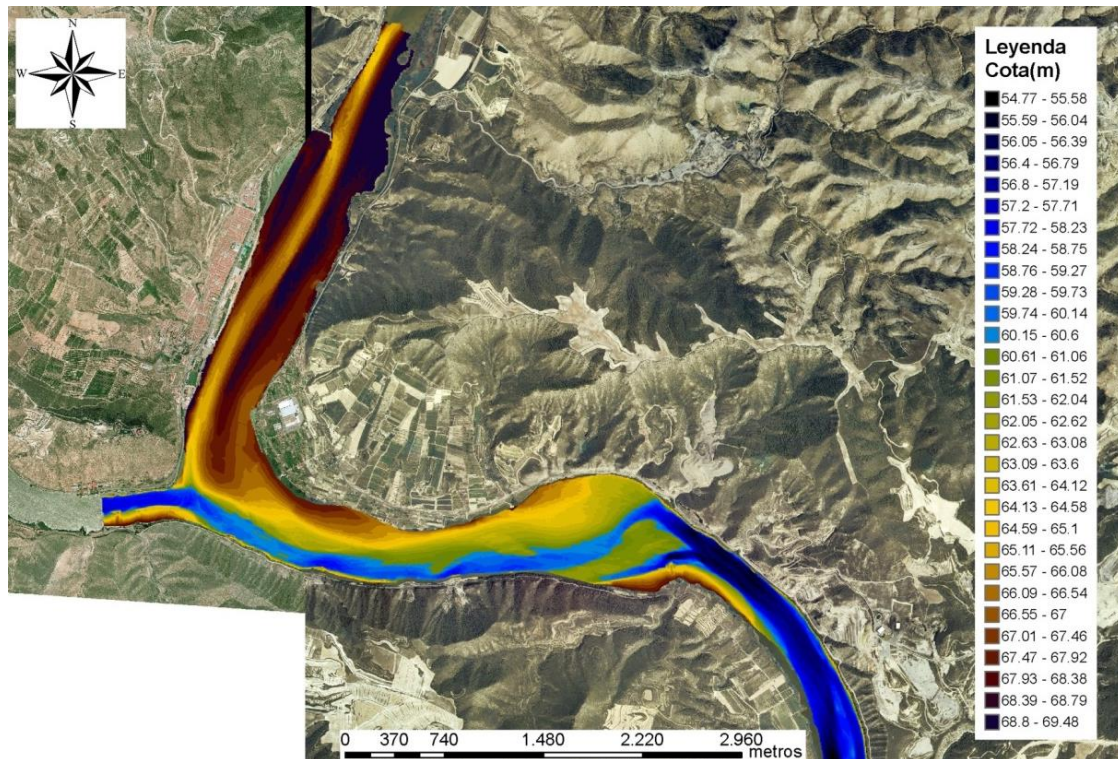


Figura 37. Vista general de la batimetría del río Segre y el tramo aguas arriba del embalse de Ribarroja de Ebro (unión de las batimetrías 2007 y 2008).

4.3 Variación batimétrica entre 2007 y 2008

En este apartado se analiza la dinámica de los sedimentos depositados en el extremo aguas arriba del embalse de Ribarroja. El análisis se basa en:

- Comparación cualitativa de la Batimetría 2008 con la Batimetría 2007. Inicialmente se realizó una comparación directa, mediante la superposición de los dos modelos digitales (estudio por perfiles) y posteriormente mediante la resta de las dos batimetrías (modelo digital de erosión y sedimentación).
- Evaluación cuantitativa del sedimento acumulado y/o erosionado en el periodo comprendido entre ambas batimetrías. Además de estimar las cantidades movilizadas, también se compara su distribución espacial.

4.3.1 Metodología

Para analizar la evolución entre las dos batimetrías realizadas en los años 2007 (4.2.3) y 2008 (4.2.5), se procedió inicialmente a comparar directamente los datos de ambas batimetrías. Dicha comparación, solamente se realizó en el eje del río y en los perfiles transversales, debido a la restricción impuesta por la información de la campaña del año 2008 (Figura 32).

4.3.2 Diferencia de batimetrías

Para comparar ambas batimetrías, se realizó la diferencia de las elevaciones de la batimetría de 2008 y las de la batimetría 2007, en primer lugar, para identificar las zonas de erosión y deposición (Figura 38), y en segundo, para cuantificar las magnitudes de dichas diferencias (Figura 39).

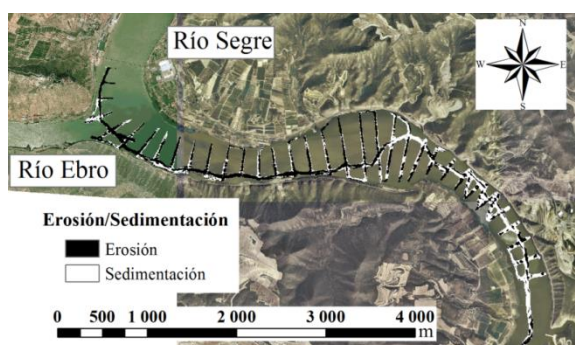


Figura 38. Zonas de erosión (negro) y zonas de deposición (blanco). Se puede observar claramente que los primeros 4000 metros aguas abajo de la confluencia Segre-Ebro son mayormente erosivos, mientras que aguas abajo la tendencia es deposicional.

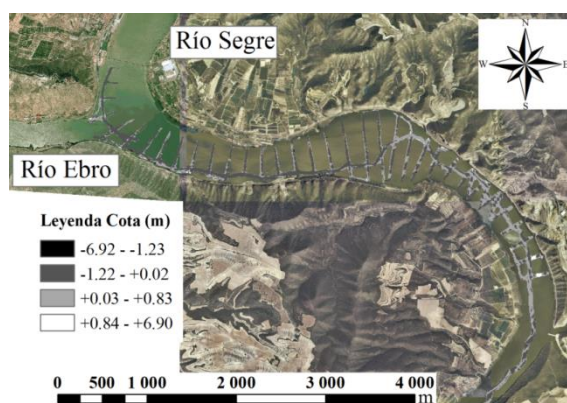


Figura 39. Diferencia de la batimetría 2007 menos la 2008. A colores más oscuros mayor erosión (negativos), colores más claros (positivos) mayor deposición.

Por otra parte, en la Figura 40 se presenta la diferencia de elevaciones entre ambas batimetrías en el eje del río.

Por lo correspondiente al eje profundo del río se muestra la diferencia de los dos ejes profundos correspondientes a la Batimetría 2008 y a la Batimetría 2007 en la Figura 40. Las

diferencias son predominantemente negativas en el primer tramo (unos 4000 m) y positivas en el segundo tramo (de los 4000 m a los 10000 m).

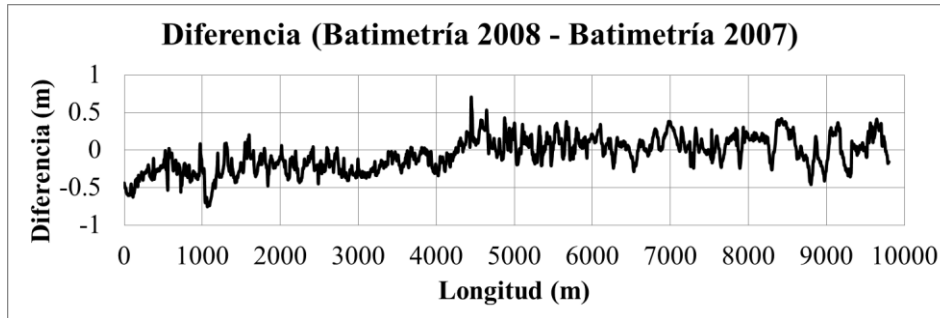


Figura 40. Diferencia de los dos modelos digitales del elevación en el eje del río (batimetría 2008 – batimetría 2007). En los primeros 4000 m se presentan erosión (valores son negativos), mientras que los restantes 6000 indican sedimentación (valores positivos).

En general, las diferencias observadas son de 30 cm como máximo. Además, mirando los perfiles transversales se puede ver que estas tendencias son más acusadas en la zona del perfil correspondiente al eje del río más que en los perfiles laterales. Esto se debe a que por el eje del río la velocidad y los caudales de circulación son mayores.

4.3.3 Variación espacial del sedimento

Para estudiar la distribución espacial del sedimento, se realizó un estudio dividiendo el embalse en tramos de longitud constante (200 m), en los que se calculó la altura media sedimentada o erosionada; posteriormente esta media se multiplicó por la superficie de dicho tramo, obteniéndose así, el volumen medio erosionado o sedimentado para cada segmento (Figura 41).

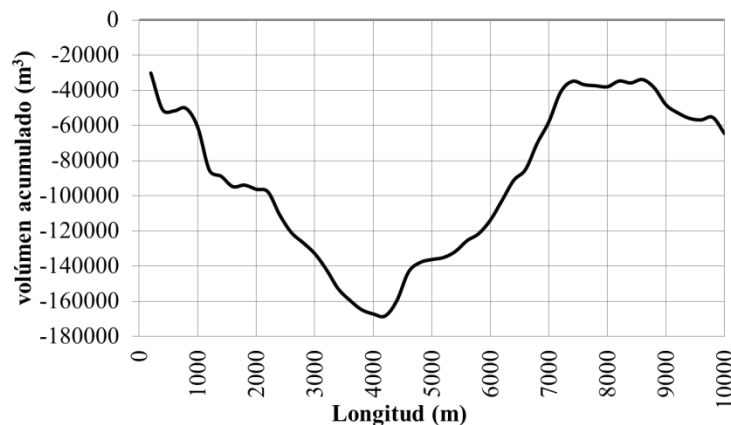


Figura 41. Curva de sedimento acumulado . Se observa que en los primeros 4000 m se produce un volumen de erosión igual al que se acumula en los siguientes 4000 m aguas abajo.

Un aspecto de interés que se observa en la Figura 41 , es que el volumen de erosión en los primeros 4000 m es similar al volumen de sedimentación en los 4000 m siguientes, o dicho de otra forma, en esta zona del embalse un volumen de unos 170.000 m³ de sedimento fue desplazado unos 4 km aguas abajo. Todo ello está directamente relacionado con el avance del frente de la masa de sedimento situada en los primeros 4000-5000 m del embalse.

4.3.4 Avenida 2008

En el periodo comprendido entre la realización de las batimetrías 2007 (octubre-noviembre de 2007) y 2008 (diciembre de 2008), aproximadamente un año, tuvo lugar un único episodio de avenida importante. La avenida se presentó principalmente en el río Ebro entre finales de mayo y principios de junio de 2008 (Figura 42), con un caudal medio diario máximo a la salida del embalse de Ribarroja de 1600 m³/s, siendo superior a los 500 m³/s durante unos 12 días (datos de caudales cedidos por ENDESA). Dado que el evento de avenida fue mayormente por el río Ebro, por lo tanto, el río Segre no aportó sedimento que pudiera reponer el que se había movilizadado hacia aguas abajo de la confluencia.

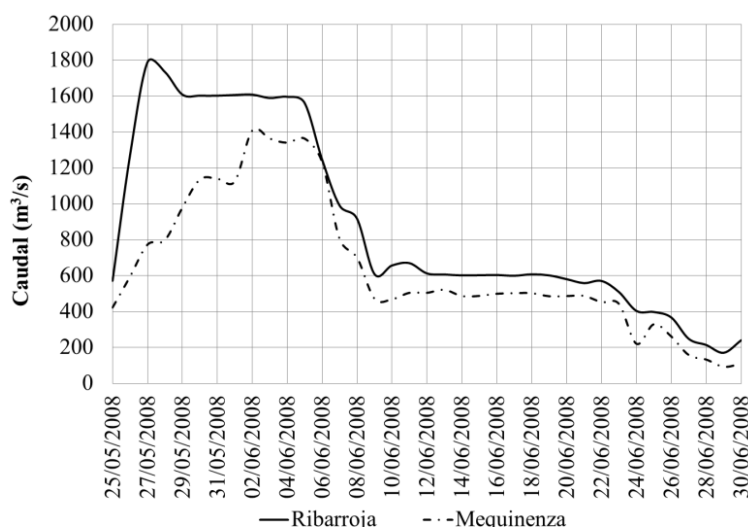


Figura 42. Caudales medios diarios desaguados por las presas de Mequinenza (inmediatamente aguas arriba del embalse de Ribarroja de Ebro y de la confluencia Ebro-Segre) y los desaguados por la presa de Ribarroja. Datos cedidos por ENDESA.

4.4 Calibración del módulo de transporte de sedimentos en suspensión del modelo iber

4.4.1 Introducción

Debido a las características del sedimento en la zona de la confluencia de Ribarroja de Ebro (Arbat-Bofill *et al.*, 2010a, 2010b; Dolz *et al.*, 2009; López *et al.*, 2012), se consideró oportuno estudiar el transporte de sedimento en suspensión y no el transporte por arrastre de fondo. Por este motivo se desarrolló un módulo de transporte de sedimentos en suspensión implementado en el modelo Iber (Bladé *et al.*, 2014); el módulo se calibró con los datos de las batimetrías de los años 2007 y 2008.

4.4.2 Calibración y validación

El módulo de transporte de sedimento en suspensión se calibró inicialmente con la diferencia de batimetrías 2007-2008 (Apartado 4.3.2) de manera que introduciendo el modelo digital de la batimetría de 2007, los parámetros del sedimento de la zona de la confluencia (López *et al.*, 2012) y el hidrograma de la avenida de mayo-junio de 2008 (Figura 42) los resultados después de la avenida fueran similares a los obtenidos con la batimetría realizada en 2008. Se calibró tanto con la magnitud de las profundidades de erosión/deposición (del orden de pocas decenas de centímetros) como con la distribución espacial del sedimento. Los valores estimados de los parámetros fueron $M_2=0.000005$ m/s y $\tau_c=1$ N/m². El resultado de la calibración se muestra en la figura 20.

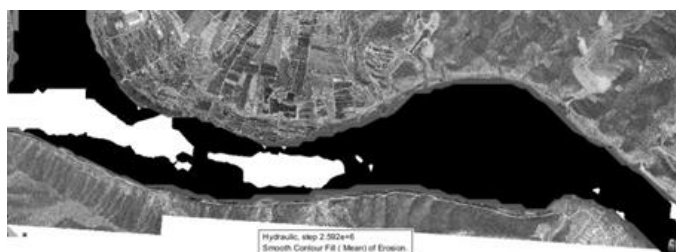


Figura 43 Zonas de erosión (blanco) y zonas de deposición (negro). Se observa que los primeros 4000 metros aguas abajo de la confluencia Segre-Ebro son mayormente erosivos, mientras que aguas abajo la tendencia es deposicional.

4.4.3 Diseño de un espigón en Mequinenza

Después de realizar la calibración, se modelizó la hidrodinámica y la dinámica erosiva o deposicional para el tramo del río Segre comprendido entre la confluencia con el río Ebro y un kilómetro aguas arriba de la población de Mequinenza, dónde se pretendía construir un espigón para proteger de la sedimentación la zona del campo de regatas. En el estudio se simularon distintas geometrías y longitudes de espigón para varios caudales de avenida y distintos niveles de embalse, posteriormente se compararon con la situación actual.

Se definieron 16 casos de estudio, distintos, correspondientes a diferentes combinaciones de longitudes de espigón, caudales del río Segre y cotas de embalse. Las longitudes del espigón estudiadas fueron de 700 m, 900 m y 1100 m (Figura 21), intentando afectar en la menor medida posible el cauce principal del río. Además, se consideró necesario simular la situación actual (espigón transversal, Figura 44) para conocer la dinámica actual y realizar las comparaciones con los casos que la modifican.

Se estudió la evolución con dos caudales diferentes: el correspondiente a un periodo de retorno de 10 años ($2682 \text{ m}^3/\text{s}$) y otro significativamente menor pero importante para el río Segre, siendo este de $500 \text{ m}^3/\text{s}$.

Referente a las cotas del embalse, se propusieron dos niveles de agua: uno correspondiente a la cota media de embalse, la 69.50 m (el embalse de Ribarroja suele ser muy estable en cuanto a niveles de agua) y otro correspondiente a la cota de 68.80 m; que es el mínimo que permite asegurar un calado de 2 m (según la normativa vigente, calado necesario para el buen funcionamiento del canal de regatas) en la zona interna del espigón.

4.4.3.1.1 Mallas de cálculo

A partir del modelo digital del terreno para cada una de las geometrías se construyó una red irregular de triángulos, que se utilizó como malla de cálculo en Iber. En la Figura 45 se presenta un detalle de la misma para el espigón de 700 m.

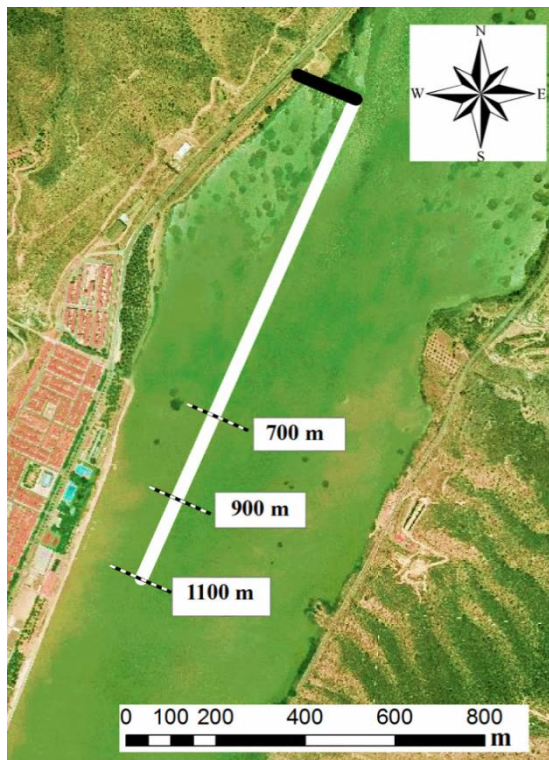


Figura 44 Longitudes de espigón simuladas. En negro se ve el espigón actual; en blanco se define la traza del futuro espigón a construir.



Figura 45 Detalle de la malla irregular de triángulos para el caso del espigón de 700 m.

4.4.3.1.2 Resultados del modelo hidrodinámico

Se simuló la hidrodinámica del río Segre para cada una de las 16 combinaciones de geometría, caudal y condiciones de contorno presentadas anteriormente, suponiendo lecho no erosionable. Ello permitió conocer el detalle de calados, valores de acción hidrodinámica y el campo de velocidades.

Los calados y los valores de la velocidad varían con el caudal y el nivel de embalse, pero en todos los casos estudiados se aprecia que la presencia del espigón separa el flujo de la margen derecha hacia el centro del cauce y aguas abajo del mismo el cauce principal vuelve a situarse muy próximo a la margen derecha. En cuanto a la influencia del espigón, se observó que una longitud de 700 m del espigón produce una menor alteración del flujo, en cambio, el espigón de 1100 m tiene suficiente longitud para afectar al trazado del cauce principal. Por otro lado, los resultados indican que a más longitud de espigón se provoca una reducción del ancho del río; y por lo tanto, las velocidades, la acción hidrodinámica (capacidad de arrastre) y los caudales específicos tienden a aumentar con la longitud del espigón.

Las mismas 16 combinaciones de geometrías, caudales y condiciones de contorno se estudiaron suponiendo lecho móvil. A continuación se describen los casos más representativos y se indican las tendencias de erosión y sedimentación obtenidas.

En la situación actual, para un caudal de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ durante 24 h y cota del embalse de 69.5 m, se producen erosiones en la zona del cauce central, desde el inicio del tramo de estudio hasta aguas abajo de la población de Mequinenza (Figura 46). El material erosionado en esta zona, una parte es depositado a ambos lados del mismo cauce central y el resto aguas abajo, donde se producen sedimentaciones en todo lo ancho del cauce aunque mayoritariamente en la margen izquierda (Figura 47). En los resultados se puede observar la tendencia de estas avenidas con caudales moderados a colmatarse el actual campo de regatas.

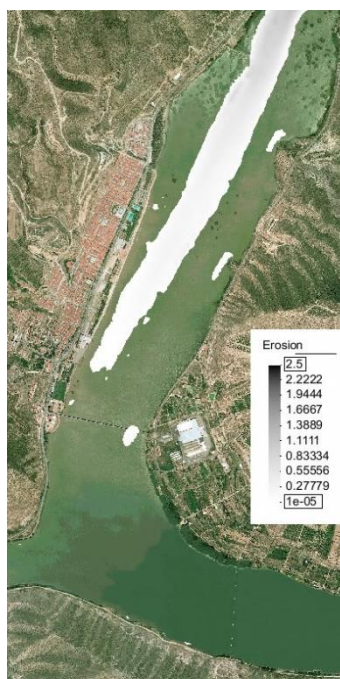


Figura 46 Erosión (en la situación actual para el caudal de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ durante 24 horas y embalse a la cota 69.5 m). Valores en metros.

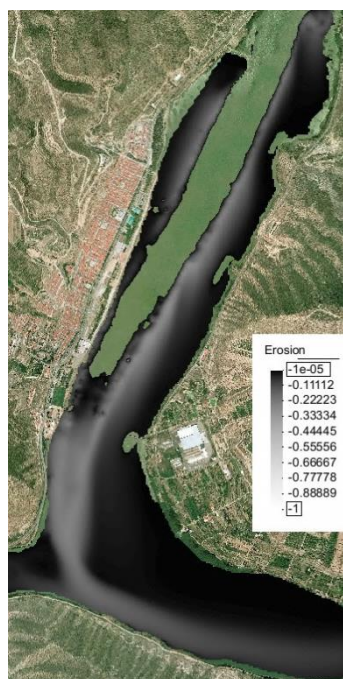


Figura 47 Sedimentación (en la situación actual para el caudal de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ durante 24 horas y embalse a la cota 69.5 m). Valores en metros.

Para el mismo caudal de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ circulando durante 24 h, pero con espigón de 700 m y cota del embalse de 69.5 m (Figura 48), la tendencia general es parecida, aunque la presencia del espigón altera la sedimentación en las proximidades de la margen derecha. Se observa que en esta margen, la sedimentación disminuye de forma considerable dentro de la zona protegida por el espigón (Figura 49), pero aumenta considerablemente aguas abajo del mismo.

Existe cierta sedimentación en la zona inferior del área protegida, por la entrada de sedimentos por la bocana debido a las recirculaciones que se producen, pero sobre todo una tendencia a formarse una barra significativa junto a la margen derecha pero aguas abajo del espigón.

Para estas condiciones, el volumen total erosionado en la zona es aproximadamente de unos 150.000 m³. De estos, aproximadamente una tercera parte se deposita aguas arriba del puente de Mequenza, mientras que el resto (100.000 m³) se depositará en lo que se puede considerar ya el cauce del río Ebro.

Los resultados del cálculo morfodinámico, reafirmaron que el espigón de 700 m era la mejor opción entre las tres longitudes de espigón estudiadas porque afectaba menos al flujo del Segre. Aun así, los resultados también mostraban que el tramo de estudio está sometido a importantes cambios morfológicos, la presencia del espigón limitaría estos cambios en la zona interior al recinto, pero en la parte exterior al espigón, se deben de prever otras actuaciones para el mantenimiento a largo plazo.

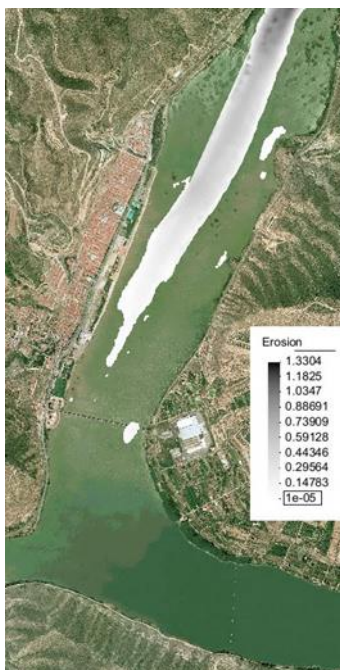


Figura 48 Erosión (espigón de 700 m de longitud, caudal de 500 m³/s durante 24 horas y embalse a la cota 69.5 m). Valores en metros.

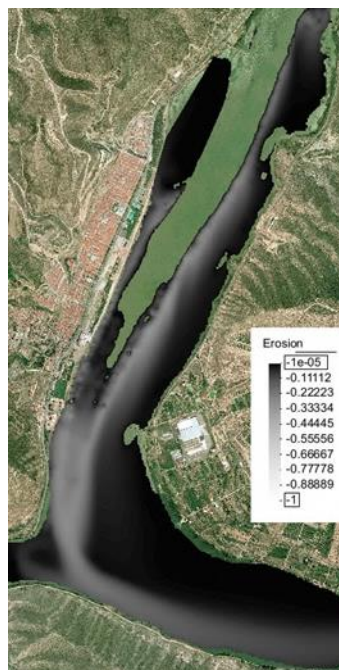


Figura 49 Sedimentación (espigón de 700 m de longitud, caudal de 500 m³/s durante 24 horas y embalse a la cota 69.5 m). Valores en metros.

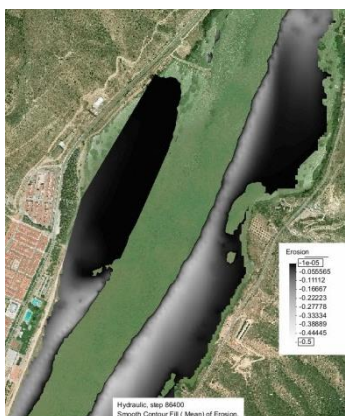


Figura 50 Detalle de la sedimentación en la parte interna del espigón (espigón de 700 m, caudal de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ durante 24 horas y embalse a la cota 69.5 m). Se puede observar la formación de la barra de sedimento aguas abajo de la punta del espigón.

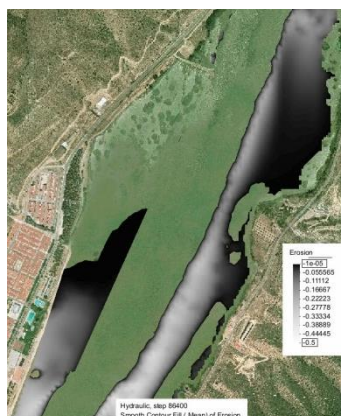


Figura 51 Detalle de la sedimentación en la parte interna del espigón (espigón de 1100 m de longitud, caudal de $500 \text{ m}^3/\text{s}$ durante 24 horas y embalse a la cota 69.5 m). Se puede observar la formación de la barra de sedimento aguas abajo de la punta del espigón.

Para un caudal de $2682 \text{ m}^3/\text{s}$ (caudal de periodo de retorno de 10 años) durante 24 horas y una cota del embalse de 69.5 m, la magnitud de las velocidades es considerablemente superior en toda la zona correspondiente al río Segre, de manera que la superficie sujeta a erosiones fuertes también es mucho mayor. En la situación toda la zona correspondiente al río Segre está sujeta a erosiones, mientras que el sedimento se deposita una vez se ha alcanzado el cauce del río Ebro y concretamente en la margen izquierda del mismo.

La tendencia a formar una barra de sedimento aguas abajo del espigón se muestra también para estos caudales grandes, así como la entrada de sedimentos dentro del recinto debido a la recirculación del agua. La magnitud de la barra es similar para cualquier longitud de espigón, así como el área del recinto afectada por sedimentaciones (Figura 53).

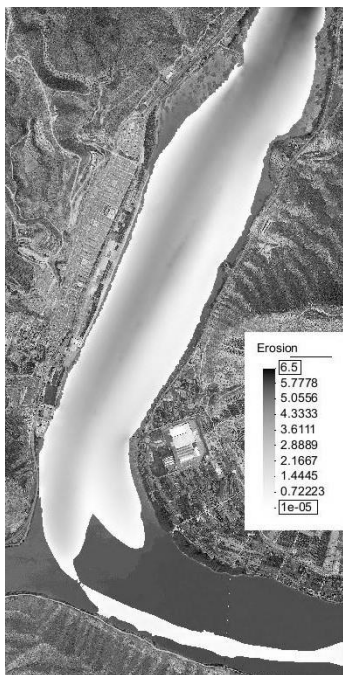


Figura 52 Erosión en la situación actual para el caudal de 2682 m³/s durante 24 horas y embalse a la cota 69.5 m. Valores en metros.

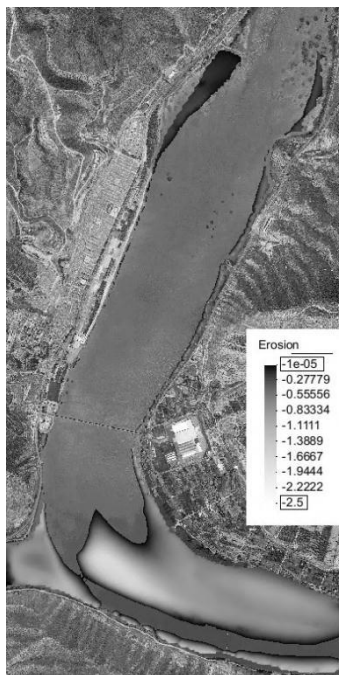


Figura 53 Sedimentación en la situación actual para el caudal de 2682 m³/s durante 24 horas) y embalse a la cota 69.5 m. Valores en metros.

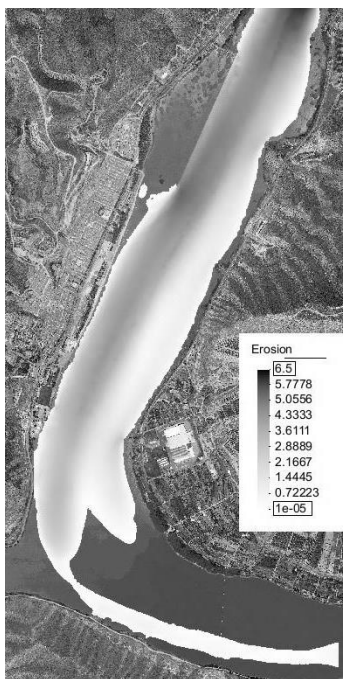


Figura 54 Erosión en el caso de espigón de 700 m de longitud para el caudal de 2682 m³/s durante 24 horas y embalse a la cota 69.5 m. Valores en metros.

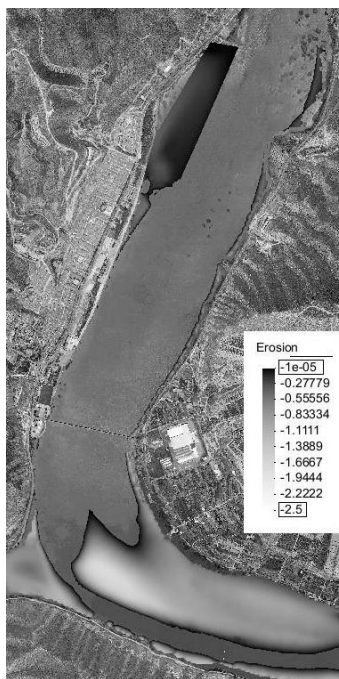


Figura 55 Sedimentación (valores de erosión en negativo) en el caso de espigón de 700 m de longitud para el caudal de 2682 m³/s durante 24 horas y embalse a la cota 69.5 m. Valores en metros.

Los resultados del cálculo morfodinámico reafirman que el espigón de 700 m sería la mejor opción. Asimismo se cree de interés señalar la importante capacidad erosiva del río Segre junto a la parte externa del espigón en su extremo aguas abajo.

4.4.3.1.3 Permeabilidad del espigón

Para evitar en la medida de lo posible agua estancada dentro del recinto del campo de regatas, también se estudió el efecto de practicar distintas aperturas en el espigón longitudinal para permitir el intercambio de caudal entre el río y el campo de regatas. Inicialmente se estudiaron tres casos con una única apertura en el extremo superior del espigón longitudinal (10, 20 y 30 m), y un caudal por el Segre de $100 \text{ m}^3/\text{s}$. En la Figura 56 y la Figura 57 se pueden ver los detalles del campo de velocidades correspondientes a 10 y 30 m de apertura respectivamente, en las dos figuras siguientes se observan los vectores de velocidad dentro del recinto del espigón.



Figura 56 Detalle del campo de velocidades para un caudal de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ en el río Segre y una apertura de 10 m. Valores en m/s.



Figura 57 Detalle del campo de velocidades para un caudal de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ en el río Segre y una apertura de 30 m. Valores en m/s.



Figura 58 Detalle del campo de vectores de velocidad para un caudal de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ en el río Segre y una aperturas de 10 m.



Figura 59 Detalle del campo de vectores de velocidad para un caudal de $100 \text{ m}^3/\text{s}$ en el Segre y una aperturas de 30 m

También se estudiaron casos en que se consideraba más de una apertura, pero las aperturas adicionales tenían poca influencia en la magnitud de la velocidad, aunque si repercutirían en el patrón de recirculación, dando lugar a un movimiento más desordenado junto a la cara interna del espigón.

4.5 Conclusiones

La entrada de sólidos al embalse de Ribarroja esta notablemente afectada por la presencia del embalse de Mequinzenza, inmediatamente aguas arriba, donde queda retenida la totalidad de sólidos transportados por arrastre de fondo y la mayor parte de los sólidos en suspensión.

Respecto a la dinámica de los sedimentos en el extremo aguas arriba del embalse de Ribarroja, se compararon las batimetrías realizadas en el año 2007 (para todo el embalse de Ribarroja de Ebro) y la de 2008 (estudiando el comportamiento del perfil del eje del río y de los perfiles transversales para el tercio superior del embalse). Mediante la comparación, se pudo evaluar la cantidad y la disposición espacial del sedimento acumulado o erosionado a lo largo del periodo. Puede observarse que en los primeros 4000 m se produce un volumen de erosión relativamente similar al que se sedimenta en los 3000 m siguientes, o dicho de otro modo, en esta zona del embalse un volumen de unos 170.000 m³ de sedimento fue desplazado unos 4 km aguas abajo. Todo ello está directamente relacionado con el avance del frente de la masa de sedimento procedente del Segre que ha ido llegando al embalse de Ribarroja y que se queda justo aguas abajo de la confluencia de los dos ríos. Por este motivo la lengua de sedimento se sitúa en los primeros 4000-5000 m del embalse, y parece ser que ésta sólo se removiliza en episodios de avenida importantes, cuando se supera cierto umbral de caudales y el agua tiene fuerza tangencial suficiente para resuspender el sedimento.

Los datos de campo y las batimetrías realizadas han servido para preparar el módulo de transporte de sedimentos en suspensión del modelo 2D Iber (Bladé *et al.*, 2014). El módulo de Iber ya ha sido utilizado en varios estudios y está disponible para los usuarios.

A posteriori también se ha realizado una tesina de final de grado que analiza con mayor detalle la deposición del sedimento así como los efectos de los parámetros en las simulaciones numéricas (Rovira i Blanch, 2014)

4.6 Referencias bibliográficas

ARBAT-BOFILL, BLADÉ, SÁNCHEZ-JUNY, & DOLZ, 2010a. 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 Mequinzenza.

ARBAT-BOFILL, BLADÉ, SÁNCHEZ-JUNY, DOLZ, COBOS, & POLANCO, 2010b. Estudio en modelo numérico del transporte sólido en suspensión del río Segre en la cola del embalse de Ribarroja de Ebro, in: Dam Maintenance and Rehabilitation II. Zaragoza.

ARBAT-BOFILL, BLADÉ, SÁNCHEZ-JUNY, & DOLZ RIPOLLÉS, 2010c. Estudio en modelo numérico de la hidrodinámica del Segre en el entorno de Mequinzenza. Anejo G.

ARBAT-BOFILL, SÁNCHEZ-JUNY, & DOLZ RIPOLLÉS, 2011. Estudi en model numèric de la hidrodinàmica de l'embassament de Sau (Anàlisi prèvia). Barcelona.

ARIATHURAI, & ARULANANDAN, 1978. Erosion Rates of Cohesive Soils. J. Hydraul. Div. 104, 279–283.

ARMENGOL, GARCÍA, COMERMA, ROMERO, DOLZ, ROURA, HAN, VIDAL, & SIMEK, 1999. Longitudinal processes in canyon type reservoirs: the case of Sau (NE Spain). Theor. Reserv. Ecol. its Appl. 313–345.

BLADÉ, CEA, CORESTEIN, ESCOLANO, PUERTAS, VÁZQUEZ-CENDÓN, DOLZ, & COLL, 2014. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. Rev. Int. Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ing. 30, 1–10. doi:10.1016/j.rimni.2012.07.004

DE POURCQ, ARBAT, & DOLZ, 2007. Batimetría 2007. Documento interno Flumen. Barcelona.

DOLZ, ARMENGOL, ROURA, DE POURCQ, ARBAT-BOFILL, & LÓPEZ, 2009. Estudio de la dinámica sedimentaria y batimetría de precisión del embalse de Ribarroja. Barcelona.

FLUMEN, & CASANOVAS-BERGÉ TOPÓGRAFOS ASOCIADOS, 2008. Memòria dels treballs realitzats a la Batimetria del Pantà de Ribarroja. Barcelona.

LÓPEZ, DOLZ, ARBAT, ARMENGOL, & ARBAT-BOFILL, 2012. Physical and chemical characterisation of superficial sediment of the Ribarroja Reservoir (River Ebro, NE Spain). Limnetica 31, 321–334.

ROURA, 2004. Incidència de l'embassament de Mequinensa en el transport de sòlids en suspensió i la qualitat del riu Ebre. Universitat Politècnica de Catalunya.

ROVIRA I BLANCH, 2014. Modelización numérica del transporte de sedimentos en suspensión. Aplicado a la cola del embalse de Ribarroja. Universitat Politècnica de Catalunya.

SMITH, & MCLEAN, 1977. Spatially averaged flow over a wavy surface. J. Geophys. Res. 82, 1735–1746.

THORNTON, KIMMEL, & PAYNE, 1990. Reservoir Limnology: Ecological Perspectives.

VAN RIJN, 1987. Mathematical modeling of morphological processes in the case of suspended sediment transport. Delft Univ. of Technology.

VARELA, GALLARDO, & LÓPEZ DE VELASCO, 1986. Retención de sólidos por los embalses de Mequinensa y Ribarroja. Efectos sobre los aportes al delta del Ebro, in: Hermes (Ed.), El sistema integrado del Ebro. M. Mariño, Madrid, pp. 203–219.

Anejo 5 Modelación numérica de la hidrodinámica en el entorno de la confluencia Ebro-Segre en 2D y 3D

Resumen de la comunicación presentada a las Jornadas de Ingeniería del Agua 2015.
Pendiente de aceptación.

Modelación numérica de la hidrodinámica en el entorno de la confluencia Ebro-Segre en 2D y 3D. Tema A. Dinámica fluvial, de embalses, estuarios y humedales.

Marina Arbat-Bofill, Ingeniera Geóloga, Instituto Flumen UPC-CIMNE

marina.arbat@upc.edu

Jordi Prats, Dr. Biólogo, Pôle Irstea-Onema “Plans d’eau”

jordi.prats@irstea.fr

Belén Martí-Cardona, Dra. Ingeniero de Caminos, Instituto Flumen UPC-CIMNE

belen.marti@upc.edu

Luis Cea, GEAMA Universida de da Coruña

luis.cea@udc.es

Ernest Bladé, Dr. Ingeniero de Caminos, Instituto Flumen UPC-CIMNE

ernest.Bladé@upc.edu

Martí Sánchez-Juny, Dr. Ingeniero de Caminos, Instituto Flumen UPC-CIMNE

marti.Sánchez@upc.edu

Daniel Niñerola, Instituto Flumen UPC-CIMNE

daniel.ninyerola@upc.edu

Josep Dolz, Instituto Flumen UPC-CIMNE

j.dolz@upc.edu

La dinámica de mezcla en la confluencia de los ríos Ebro y Segre, situado en la cola del embalse de Riba-roja (NE de España), depende de las diferentes características de ambos ríos (temperatura, caudal, concentración de sólidos en suspensión). Este caso de estudio se ha utilizado para comparar el funcionamiento de dos modelos numéricos que incluyen módulos de intercambio de calor entre agua y atmósfera: Iber (en 2D, promediado verticalmente) y FreeFlow.

Mientras que el río Ebro está muy regulado con la presa de Mequinenza aguas arriba de la confluencia, el río Segre está menos afectado por la regulación. Como consecuencia, ambos ríos tienen patrones de temperatura y transporte de sedimentos en suspensión muy diferentes a lo largo del año, con diferencias térmicas que llegan a alcanzar los 10 °C (Figuras 1 y 4), y los procesos de mezcla en la confluencia determinan el comportamiento de la estratificación en el embalse de Riba-roja.

Iber (Bladé et al., 2014) es un modelo bidimensional promediado en la dimensión vertical para la simulación de flujo de lámina libre en ríos y estuarios, desarrollado por el GEAMA (Universidad de A Coruña) y el Instituto Flumen (UPC-CIMNE). Iber incluye un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia, y un módulo de transporte de sedimentos. Actualmente se está desarrollando un nuevo módulo de calidad del agua.

El modelo FreeFlow (Cea et al., 2009) es un modelo hidrodinámico tridimensional en volúmenes finitos, diseñado para el cálculo de los caudales ambientales. El modelo resuelve las ecuaciones RANS. El código sigue en desarrollo pero ya ha sido probado y validado en varios casos demostrando exactitud en la predicción de velocidades y en la representación de estructuras de flujo en 3D. Recientemente se ha implementado un módulo para simular la temperatura del agua en superficie, lo que permite el cálculo de balance de calor de superficie en función de las variables meteorológicas.

El 31 de marzo y el 11 de octubre de 2011 el Instituto Cartográfico de Cataluña (ICC) hizo un vuelo sobre la confluencia Ebro-Segre con el fin de obtener imágenes térmicas de la zona a

través del sensor hiperespectral TASI (Prats et al., 2013). También se realizaron medidas in situ de la temperatura superficial del agua mediante termómetro y radiómetro.

Los caudales del 31 de marzo (Fig. 3.1) fueron de 493 m³/s en el Ebro, y 91 m³/s en el Segre. La temperatura del agua del río Ebro era de 11 °C, mientras que la temperatura del agua en el río Segre era de 15 °C. Los datos de campo mostraron que las aguas más cálidas del Segre tendían a flotar y mantenerse por encima del agua del Ebro. El modelo Iber predice un flujo paralelo de ambos ríos aguas abajo de la confluencia que se van mezclando paulatinamente aguas abajo. El comportamiento hidrodinámico simulado por FreeFlow es más similar al comportamiento observado, con el agua del río Segre que fluye por encima del agua Ebro.

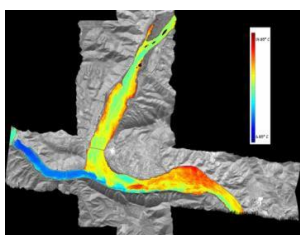


Figura 60. Temperatura sensor aerotransportado (31-03-11).

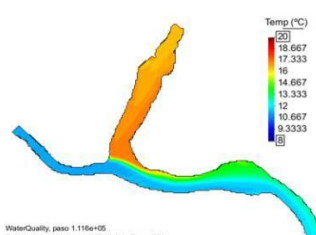


Figura 61. Simulación Iber (31-03-11).

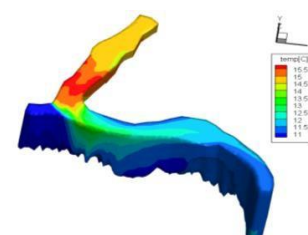


Figura 62. Simulación mediante FreeFlow (31-03-11).

En el caso del 11 de octubre (Figs. 4-6) los caudales fueron de 397 m³/s en el Ebro, y 16 m³/s en el Segre. El agua del Segre más fría (inferior a 20 °C) era más fría que el agua del Ebro (21-25 °C). La simulación FreeFlow (Fig. 6) predijo con exactitud el punto de hundimiento, mientras que mediante Iber (Fig. 5) se predijo el contacto 300 m aguas abajo y también mostró un flujo superficial más frío en la margen izquierda.

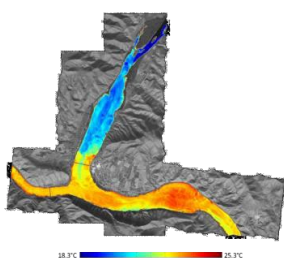


Figura 63. Temperatura sensor aerotransportado (11-10-11).

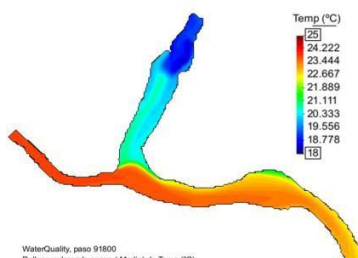


Figura 64. Simulación Iber (11-10-11).

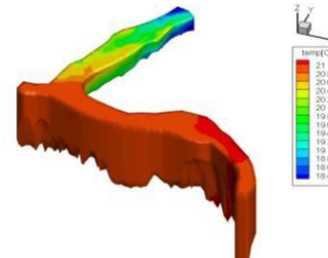


Figura 65. Simulación mediante FreeFlow (11-10-11).

Hasta ahora, el trabajo de modelado ha consistido en la verificación del comportamiento hidrodinámico global predicho y la capacidad de los modelos para predecir la dinámica térmica de la confluencia. Los datos de campo muestran que la naturaleza de la hidrodinámica de confluencia es marcadamente 3D. Así, el modelo Iber, que es un modelo de una sola capa promediada verticalmente, no es capaz de reproducir con precisión los procesos de mezcla observados. En cambio, el comportamiento hidrodinámico simulado por FreeFlow es más similar al comportamiento observado.

5.1 Referencias bibliográficas

Bladé, E., Cea, L. Corestein, G. Escolano, Puertas, J. Vázquez-Cendón, E. Dolz, J. y Coll, (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. En: Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería 30, 1–10.

Cea, L., Stelling, G. y Zijlema, M. (2008) Non-hydrostatic 3D free surface layer-structured finite volume model for short wave propagation. En: International Journal for Numerical Methods in Fluids 61, 382–410.

Prats, J., Arbat-Bofill, M., Martí-Cardona, B., Dolz, J. y Armengol, J. (2013) Utilidad de los sensores térmicos aerotransportados en estudios de hidrodinámica de embalses y ríos. III Jornadas de Ingeniería del Agua, 23-24 October, València (Spain).

Anejo 6 Módulo “temp_sup”

```

*****
*   fichero temp_sup.f
*   Input data for the code FREEFLOW-3D
*   Reads data for Heat sources
*   Ernest y Marina 11/07/13
*   Última modificación 20-04-15
*****
*
*   Heat_sources
*
module heatsource
*
real*8,save,allocatable::radsn_time(:),timerad(:)
real*8,save,allocatable::tair_time(:),timetair(:)
real*8,save,allocatable::humrel_time(:),timehumrel(:)
real*8,save,allocatable::vwind_time(:),timevwind(:)
real*8,save,allocatable::tdew_time(:),timetdew(:)
real*8,save,allocatable::radsn(:),radlw(:),radout(:),radnet(:)
real*8,save,allocatable::hevap(:),heatconduct(:)
real*8,save,allocatable::Hw(:),Hc(:),H_A(:),Ha(:),Hsn(:),Han(:)
real*8,save,allocatable::He(:),coef_cr(:),coef_a(:),coef_esw(:)
real*8,save,allocatable::ecoef_a(:),ecoef_s(:),srctem(:)
end module heatsource
*
subroutine readinputtemp
*****
*   subrutina readinputtemp
*   Input data for the code FREEFLOW-3D
*   Reads data for Heat sources
*   Ernest y Marina 03/04/13
*****
*
use heatsource
use modulo_gen !Ernest 12/11/13
include 'fcommon'
include 'fcommontemp'

!Allocatar per nelem

```

```

allocate(radout(nelem))
radout=0.
allocate(radsn(nelem))
radsn=0.
allocate(radlw(nelem))
radlw=0.
allocate(radnet(nelem))
radnet=0.
allocate (hevap(nelem))
hevap=0.
allocate (heatconduct(nelem))
heatconduct=0.
allocate(Hw(nelem))
Hw=0.
allocate(He(nelem))
He=0.
allocate(Ha(nelem))
Ha=0.
allocate(Hc(nelem))
Hc=0.
allocate(Han(nelem))
Han=0.
allocate(Hsn(nelem))
Hsn=0.
allocate(H_A(nelem))
H_A=0.
allocate(coef_cr(nelem))
coef_cr=0.
allocate(coef_a(nelem))
coef_a=0.
allocate(coef_esw(nelem))
coef_esw=0.
allocate(ecoef_a(nelem))
ecoef_a=0.
allocate(ecoef_s(nelem))
ecoef_s=0.
allocate(srctem(nelem))
srctem=0.

```

```

write(6,*)'Leyendo parametros de temperatura'
open(unit=11,file='temp_param.dat',err=100,status='old')

```

```

read (11,*)k_eq_flujo  ! 1 CE-QUAL-W2 2 método PRATS y 3 ELCOM
c  Parámetros CE-QUAL-W2 (si k_eq_flujo = 1)
read (11,*)cespw    != 4186.d0
read (11,*)emissiv  != 0.97d0
read (11,*)StephBoltz != 5.67e-8
read (11,*)BowenCoef != 0.47d0
read (11,*)evapcoef_a != 9.2d0
read (11,*)evapcoef_b != 0.46d0
read (11,*)evapcoef_c != 2d0
read (11,*)rtlw    != 0.3d0
read (11,*)cloudc  != 0.2d0 cloud cover
c  Parámetros Jordi Prats (si k_eq_flujo = 2)
c  !repite StephBoltz
read (11,*)alpha_d  !=0.06

```

```

read (11,*)beta_hendersonsellers !=0.03
read (11,*)coefL_v   != 1.0d0
read (11,*)claridad  != 1.0d0 coef. claridad
read (11,*)coef_cd   != 0.0013
read (11,*)patm      != 101300
c  Parámetros ELCOM/DYRESM (si k_eq_flujo = 3)

*
*****
***** LECTURA DATOS ficheros *****
*****

write(6,*)'Leyendo distribucion temporal de radiacion neta'
open(unit=11,file='radsn.dat',status='old')
  read(11,*)ntimerad
  allocate(timerad(ntimerad),radsn_time(ntimerad))
  do i=1,ntimerad
    read(11,*)timerad(i),radsn_time(i)
  enddo
close(11)

write(6,*)'Leyendo distribucion temporal de temperatura del aire'
open(unit=11,file='tair.dat',status='old')
  read(11,*)ntimetair
  allocate(timetair(ntimetair),tair_time(ntimetair))
  do i=1,ntimetair
    read(11,*)timetair(i),tair_time(i)
  enddo
close(11)

write(6,*)'Leyendo distribucion temporal de la vel del viento'
open(unit=11,file='vwind.dat',status='old')
  read(11,*)ntimevwind
  allocate(timevwind(ntimevwind),vwind_time(ntimevwind))
  do i=1,ntimevwind
    read(11,*)timevwind(i),vwind_time(i)
  enddo
close(11)

write(6,*)'Leyendo distribucion temporal de la humedad relativa'
open(unit=11,file='humrel.dat',status='old')
  read(11,*)ntimehumrel
  allocate(timehumrel(ntimehumrel),humrel_time(ntimehumrel))
  do i=1,ntimehumrel
    read(11,*)timehumrel(i),humrel_time(i)
  enddo
close(11)

write(6,*)'Leyendo distribucion temporal de la TDEW'
open(unit=11,file='tdew.dat',status='old')
  read(11,*)ntimetdew
  allocate(timetdew(ntimetdew),tdew_time(ntimetdew))
  do i=1,ntimetdew
    read(11,*)timetdew(i),tdew_time(i)
  enddo
close(11)

```


100 continue

```
inst_rad=1
tsup_rad=0
tinf_rad=0
```

```
return
end subroutine
```

subroutine temp_sup(inod)

```
*****
*   subrutina temp_sup
*   Balance tem_sup for the code FREEFLOW-3D
*   Surface Heat Balance
*   Ernest y Marina 03/04/13
*   Last modification 20/12/14
*****
*
  use heatsource
  use modulo_gen
  include 'fcommon'
  include 'fcommontemp'
*
* Según ecuaciones del MODELO 2d CE-QUAL-W2
* marina 13/11/13
*
  if (k_eq_flujo.eq.1) then !método CE-QUAL-W2 (si k_eq_flujo = 1)
*
*****
***** Introducción balance temperatura superficial (Hn)*****
*****
*
*****
***** 1. Metodología CE-QUAL-W2 *****
*****
c Radiación neta (se lee, estación meteo) (Hs+Ha-Hsr-Har)
if (time.ge.tsup_rad) then
  do jtime=inst_rad,ntimerad-1
    tinf=timerad(jtime)
    tsup=timerad(jtime+1)
    if(time.ge.tinf.and. time.lt.tsup)then
      tinf_rad=tinf
      tsup_rad=tsup
      inst_rad=jtime
*   radiacion neta leída (W/m2)
      radinf = radsn_time(jtime)
      radsup = radsn_time(jtime+1)
    exit
  end if
  enddo
endif
  radsn =(radsup*(time-tinf_rad)+radinf*(tsup_rad-time))/
  &(tsup_rad-tinf_rad)
```

continue

```

c Radiación onda larga neta (**de la formulació ppt del CWR DYRESM**)
c
c Radiación solar de onda larga (Ha)
c Radiación solar de onda larga reflejada (Har)
c calcula tair en función de tinf tsup
do jtime=1,ntimetair-1
  tinf=timetair(jtime)
  tsup=timetair(jtime+1)
  if ((time.ge.tinf).and.(time.lt.tsup)) then
c   tair (en grados K)
    tairinf = tair_time(jtime)
    tairsup = tair_time(jtime+1)
    tair=(tairsup*(time-tinf)+tairinf*(tsup-time))/(tsup-tinf)

    emissivair=1

    radlw(inod)= -emissiv*(StephBoltz*(273.2+(tempold(inod)))
& **4)*(emissivair*StephBoltz*(273.2+tair)**4)*(1-rtlw)
& *(1+0.17d0*(cloudc)**2.)
    exit
  end if
enddo
continue

c Radiación emitida (se calcula) (Hbr)
  radout(inod)=emissiv*StephBoltz*(tempold(inod)+ 273.15)**4.
  !ok para phiold en grados K (o en °C + 273.15) ok

c Pérdidas de calor por evaporación (He)
c calcula velwind en función de tinf y tsup
do jtime=1,ntimevwind-1
  tinf=timevwind(jtime)
  tsup=timevwind(jtime+1)
  if ((time.ge.tinf).and.(time.lt.tsup)) then
c   vwind (en m/s)
    vwindinf=vwind_time(jtime)
    vwindsup=vwind_time(jtime+1)
    vwind=(vwindsup*(time-tinf)+vwindinf*(tsup-time))/(tsup-tinf)
    exit
  end if
enddo

continue

do jtime=1,ntimetdew-1
  tdinf=timetdew(jtime)
  tdsup=timetdew(jtime+1)
  if ((time.ge.tinf).and.(time.lt.tsup)) then
c   tdew (en grados °C)
    tdewinf=tdew_time(jtime)
    tdewsup=tdew_time(jtime+1)
    tdew=(tdewsup*(time-tinf)+tdewinf*(tsup-time))/(tsup-tinf)
    exit
  end if
enddo

```

```

    end if
  enddo
  continue

do jtime=1,ntimehumrel-1
  tinf=timehumrel(jtime)
  tsup=timehumrel(jtime+1)
  if ((time.ge.tinf).and.(time.lt.tsup)) then
c   humrel
    humrelinf = humrel_time(jtime)
    humrelsuf = humrel_time(jtime+1)
    humrel=(humrelsuf*(time-tinf)+humrelinf*(tsup-time))/
&    (tsup-tinf)
    exit
  end if
enddo
continue

c cálculo función f(W)evap
  evapWSf= evapcoef_a+evapcoef_b*(vwind)**evapcoef_c

c cálculo de la presión de vapor atmosférica (mmHg) -falta repassar!
C   ecoef_a=2.1718*(10.**10.)*exp(-4157/(tair+ 273.15-33.91))
C   &*humrel/100.
  ecoef_a = exp(2.3026*(7.5*(tdew-273.15)/(tdew-273.15+237.3)
&   +0.6609)) !CE-QUAL-W2 está mal¿?

c cálculo de la presión de vapor a la superficie del agua (mmHg)

C   ecoef_s(inod) = exp(2.3026*(7.5*(tempold(inod)-273.15)/
C   & (tempold(inod)-273.15+237.3)+0.6609)) !CE-QUAL-W2

  ecoef_s=2.1718*(10.**10.)*exp(-4157.d0/(tempold(inod)+
&   273.15-33.91)) !J. Prats

  hevap(inod)=evapWSf*(ecoef_s(inod)-ecoef_a(inod))

c Conducción de calor (se lee tair y se calcula) (Hc)
c calcula tair en función de tinf tsup
do jtime=1,ntimetair-1
  tinf=timetair(jtime)
  tsup=timetair(jtime+1)
  if ((time.ge.tinf).and.(time.lt.tsup)) then
c   tair (en grados K)
    tairinf = tair_time(jtime)
    tairsup = tair_time(jtime+1)
    tair=(tairsup*(time-tinf)+tairinf*(tsup-time))/(tsup-tinf)
    exit
  end if
enddo

continue

  heatconduct(inod)=BowenCoef*evapWSf*(tempold(inod)-tair)

c balance de radiaciones: formulación 1 - según CE-QUAL-W2 (Hn)

```

```

c      radnet=radsn+hevap+heatconduct-radout

      radnet(inod)=radsn(inod)+heatconduct(inod)-radout(inod)+
      hevap(inod)

c      Conversión a incremento de temperatura
      dens=1000 !en kg/m3 (consideramos la densidad ctte)
      srctem(inod)= radnet(inod)*areaface(inod)/(cespw*dens)
*
*****
***** 2. Eqs. Tesis de Jordi Prats (henderson & Sellers, 1986) *****
*****

      elseif (k_eq_flujo.eq.2) then !método Jordi Prats (k_eq_flujo = 2)

* Introducción balance temperatura superficial (HA)*

* balance de radiaciones formulación 2 - según Tesis Jordi Prats (HA)
* H_A = Hsn + Han - Hw - He + Hc + Hf
*
* H_A = flujo calor intercambiado con la atmosfera (W/m-2)
* Hsn = Radiación solar absorbida por el agua (W/m-2)
* Han = radiación atm de onda larga absorbida por el agua (W/m-2)
* Hw = radiación onda larga emitida por el agua (W/m-2)
* He = pérdida de calor por evaporación (W/m-2)
* Hc = intercambio de calor sensible (W/m-2)
* Hf = calor por fricción (W/m-2) **se desprecia
* **Se desprecia el intercambio de calor debido a la lluvia

* H_A = Hsn + Han - Hw - He + Hc

c      Radiación solar (Hsn) (W/m-2)
      if (time.ge.tsup_rad) then
      do jtime=inst_rad,ntimerad-1
        tinf=timerad(jtime)
        tsup=timerad(jtime+1)
        if(time.ge.tinf.and. time.lt.tsup)then
          tinf_rad=tinf
          tsup_rad=tsup
          inst_rad=jtime
*          radiacion neta leída (W/m2)
          radinf = radsn_time(jtime)
          radsup = radsn_time(jtime+1)
          exit
        end if
      enddo
      endif
      radcn =(radsup*(time-tinf_rad)+radinf*(tsup_rad-time))/
      &(tsup_rad-tinf_rad)
      continue

c      H_sd= (Ch. 10? J. prats)
c      H_sD= H_s-H_sd
c      H_sn=H_s-(alpha_d*H_sd+alpha_D*H_sD)
c      !H_s tiene que ser rad incidente medida

```

!alpha_d = 0.06 (tesis J.Prats pg. 194)

Hsn(inod)=radcn

c Han = radiación atm de onda larga absorbida por el agua (W/m-2)

c calcula tair en función de tinf tsup

```
do jtime=1,ntimetair-1
  tinf=timetair(jtime)
  tsup=timetair(jtime+1)
  if ((time.ge.tinf).and.(time.lt.tsup)) then
c    tair (en grados °C)
    tairinf = tair_time(jtime)
    tairsup = tair_time(jtime+1)
    tair=(tairsup*(time-tinf)+tairinf*(tsup-time))/(tsup-tinf)
  exit
end if
enddo
```

continue

c calcula humrel en función de tinf tsup

```
do jtime=1,ntimehumrel-1
  tinf=timehumrel(jtime)
  tsup=timehumrel(jtime+1)
  if ((time.ge.tinf).and.(time.lt.tsup)) then
c    humrel (en %)
    humrelinf = humrel_time(jtime)
    humrelsup = humrel_time(jtime+1)
    humrel=(humrelsup*(time-tinf)+humrelinf*(tsup-time))/
&    (tsup-tinf)
  exit
end if
enddo
```

continue

c Calcula Ha (W/m-2) y Han (W/m-2)

```
ecoeff_a=2.1718*(10.**10)*exp((-4157.d0)/(tair+273.15-33.91))*
& (humrel/100.)
```

```
Ha=StephBoltz*(94.d0+12.6d0*log(ecoeff_a)-13.d0
& *claridad+0.341d0*(tair+273.15d0)**4.d0
!Aubinet 1994
```

```
Han(inod)=(1.-beta_hendersonsellers)*Ha(inod)
!Henderson-Sellers, 1986
```

*

* Hw = radiación onda larga emitida por el agua (W/m-2)

```
Hw(inod)=emissiv*StephBoltz*(tempold(inod)+273.15)**4.
!phiold en °C (+ 273.15 ok)
!emissiv 0.96-0.97 (Henderson&Sellers, 1986/Bonnet et al., 2000)
```

c He = pérdida de calor por evaporación (W/m-2)

c calcula velwind en función de tinf tsup

```

do jtime=1,ntimevwind-1
  tinf=timevwind(jtime)
  tsup=timevwind(jtime+1)
  if ((time.ge.tinf).and.(time.lt.tsup)) then
c    vwind (en m/s)
    vwindinf=vwind_time(jtime)
    vwindsup=vwind_time(jtime+1)
    vwind=(vwindsup*(time-tinf)+vwindinf*(tsup-time))/(tsup-tinf)
    exit
  end if
enddo

continue

! coef_cr=(0.0017*(tempold(inod)-tair)**(1/3))/(coef_cd)
coef_cd=0.0013 ! Salençon&Thebault, 1997

if ((tempold(inod)).ge.(tair))then
  coef_cr(inod)=(0.0017d0*(tempold(inod)-tair)**(1.d0/3.d0))
  &/ (coef_cd*vwind)
else
  coef_cr(inod)=0.0
endif

if (coef_cr(inod).le.(1.37d0))then
  coef_a(inod)=0.73d0*coef_cr(inod)
else
  coef_a(inod)=1.d0
endif

coef_esw(inod)=2.1718d0*(10.**10.)*exp((-4157.d0)/(tempold(inod)+
& 273.15-33.91))
! ecoef_a calculado para Ha (más arriba)
!! He=-1.15*(10**(-8))*coef_cd*vwind*(1+coef_a*coef_cr)*(coef_esw
!! & -ecoef_a)*dens*coefL_v
! coef_cd=0.0013d0 ! Salençon&Thebault, 1997

dens=1000. !en kg/m3
He(inod)=(-1.15d0)*(10.d0**(-8.d0))*coef_cd*vwind*(1.d0+
& coef_a(inod)*coef_cr(inod))*(coef_esw(inod)-ecoef_a(inod))
& *dens*coefL_v
!Sill, 1983

* Hc = intercambio de calor sensible
ecoef_sw=400.d0
!patm=101300 Pa
!K_h/K_v = 1 (Henderson&Sellers, 1986)

Hc(inod)=He(inod)*0.00061d0*patm*((tempold(inod)-tair)/
& (ecoef_sw-coef_a(inod)))
*
H_A(inod)=Hsn(inod)+Han(inod)-Hw(inod)+Hc(inod)-He(inod)

* Conversión a incremento de temperatura
dens=1000. !en kg/m3 (consideramos la densidad ctte)
*

```

srctem(inod)= H_A(inod)*areaface(inod)/(cespw*dens) !en °C*volume/deltat