

Proyecto TRACER

Estudios de dispersión
de contaminantes
en ríos y embalses

i + d

Colección Documentos I+D 9.2004

Proyecto TRACER

Estudios de dispersión de contaminantes en ríos y embalses

Autores: M^a del Carmen Palancar

José Manuel Aragón

*Departamento de Ingeniería Química
de la Universidad Complutense de Madrid*

Roberto Gil

*Área de Ciencias de la Tierra
Consejo de Seguridad Nuclear*

Colección
Documentos I+D
9.2004

CSN  **CONSEJO DE
SEGURIDAD NUCLEAR**

Colección: Documentos I+D

Referencia: DID-09.04

Los autores de esta memoria quieren expresar su agradecimiento al CSN por la financiación del proyecto TRACER y por la ayuda, atención, asesoramiento y facilidades que han recibido, en todas las fases del proyecto, del personal del departamento Área de Ciencias de la Tierra.

Así mismo, quieren expresar su agradecimiento a las Confederaciones Hidrográficas del Tajo, del Ebro, del Júcar y Parque Natural de Monfragüe por la agilidad que han mostrado en la tramitación de autorizaciones y en el caso de las dos primeras, por su disponibilidad para facilitar las tareas de documentación y realización de las campañas de campo. Un especial agradecimiento a las empresas explotadoras de las centrales hidroeléctricas y centrales nucleares instaladas en los sistemas estudiados, Iberdrola, Unión Fenosa y Nuclenor, que han aportado al proyecto importante información acerca de sus instalaciones y una gran ayuda material, embarcaciones y sus pilotos, sin la cual no habría sido posible el desarrollo del proyecto.

Quieren también agradecer los consejos, asesoramiento y colaboración prestada por el personal del Cedex que participó en el proyecto, en especial a Ricardo Greciano y Antonio Plata.

Por último, pero no por ello menos importante, un especial y entrañable agradecimiento a Fernando Sánchez y Haday López que, como becarios del proyecto, han trabajado en todas las tareas desarrolladas en el mismo; a Beatriz Aragón y Francisco Valverde que han desarrollado la nueva versión del código CORVEL; a los alumnos de 5º curso de la titulación de Ingeniero Químico que han colaborado en diferentes tareas del proyecto y a los pilotos de las embarcaciones de las empresas antes citadas por el exquisito trato dado y por su ayuda en la realización de las medidas experimentales, así como a Jesús Alegría del CSN.

Copyright 2004. Consejo de Seguridad Nuclear

Publicado y distribuido por:
Consejo de Seguridad Nuclear
Justo Dorado, 11. 28040 - Madrid
<http://www.csn.es>
peticiones@csn.es

Maquetación: Digrafic, C.B.
Imprime: Imprenta Fareso, S. A.

I.S.B.N.: 84-689-0192-X
Depósito Legal: M. 50.241-2004

Índice

Introducción	7
1. Antecedentes	8
2. Proyecto Tracer.....	15
2.1. Objetivos.....	17
2.2. Centrales nucleares y sistemas hidrológicos.....	17
2.3. Estructura.....	23
Documentación de sistemas	25
1. Descripción hidrográfica e hidrológica	26
1.1. Cuenca del río Ebro	27
1.2. Cuenca del río Tajo.....	41
1.3. Cuenca del río Júcar	57
2. Flujos de agua en los sistemas hidrológicos	62
2.1. Caudales en el río Ebro.....	63
2.2. Flujos de agua en Embalses.....	64
3. Condiciones meteorológicas	71
3.1. Irradiación solar	72
3.2. Temperatura ambiente.....	73
3.3. Presión atmosférica.....	74
3.4. Velocidad del viento.....	76
Campañas de campo	77
1. Metodología	78
1.1. Campañas en ríos.....	78
1.1.1. Métodos de medida y análisis instrumental.....	78
1.1.2. Planificación de las campañas	79
1.2. Campañas en embalses	84
1.2.1. Métodos de medida y análisis instrumental.....	88
1.2.2. Planificación de las campañas	89
2. Descripción de las campañas.....	90
2.1. Resultados de campañas de campo en ríos	90
2.2. Resultados de campañas de campo en embalses.....	106
Modelización	153
1. Elaboración de resultados	154
1.1. Dispersión en ríos	154
1.2. Resultados de campañas en ríos.....	161
1.3. Dispersión en embalses.....	174
1.4. Resultados de campañas en embalses	185
2. Modelización de sistemas hidrológicos.....	212
2.1. Aspectos generales de la modelización	212
2.2. Aspectos particulares de la modelización.....	220
Código Corvel	247
1. Introducción	248
2. Descripción funcional del sistema.....	249
3. Información almacenada en el sistema.....	254
3.1. Información instalada en el software de origen	254
3.2. Información requerida al usuario	256

4. Interfaz de comunicación.....	257
4.1. Interfaces de adquisición de datos.....	258
4.2. Interfaz de progreso de simulación.....	259
4.3. Interfaz de resultados.....	260
4.4. Barras de menús y herramientas.....	261
Conclusiones, beneficios de la investigación y recomendaciones	267
1. Conclusiones.....	268
2. Beneficios de la investigación	269
2.1. Caracterización de sistemas hidrológicos	269
2.2. Desarrollo de códigos.....	270
2.3. Documentación, publicaciones científicas y presentaciones realizadas.....	271
2.4. Formación	272
3. Recomendaciones	273
Referencias bibliográficas	275

Introducción

La regulación nuclear exige que se revise la capacidad del medio hídrico para retrasar, dispersar, diluir o concentrar los efluentes líquidos radiactivos en aquellos emplazamientos con centrales nucleares.

Aunque la probabilidad de ocurrencia de vertidos incontrolados de líquidos radiactivos a las aguas superficiales desde instalaciones nucleares o radiactivas es pequeña, debe disponerse de los medios adecuados para mitigar las consecuencias de estos hipotéticos escapes. Con tal finalidad se ha desarrollado el proyecto Tracer. Dentro del citado proyecto se ha adaptado y calibrado el código CORVEL, dedicado al cálculo de concentraciones en tiempo real de radioisótopos contenidos en vertidos líquidos accidentales, en aguas superficiales.

Las centrales nucleares, en operación normal y en situación de accidente, pueden descargar efluentes radiactivos tanto al entorno hídrico como a la atmósfera. Cuando esto sucede, se produce una transferencia de radionucleidos al medio ambiente, lo que supone a su vez, ya sea de forma directa o indirecta, que las personas se vean afectadas por esos efluentes. La regulación nuclear exige realizar un proceso de análisis encaminado a identificar, valorar, prevenir y comunicar los efectos de dicha actividad sobre el medio ambiente y más concretamente sobre las personas.

Para evaluar las consecuencias radiológicas que pueden producir dichos efluentes, tanto al individuo como a la población, existen modelos dosimétricos que estudian la transferencia de radionucleidos y que en definitiva sirven para realizar un cálculo de la dosis recibida según las distintas vías de exposición.

1. ANTECEDENTES

El avance experimentado por la Informática y sus aplicaciones durante las tres últimas décadas ha impulsado el desarrollo de un gran número de códigos de ordenador que permiten realizar la predicción de la evolución, en el espacio y en el tiempo, de parámetros característicos del medio hídrico.

En concreto, en la década de los años 80, se empiezan a desarrollar códigos de cálculo de dosis debida a radioisótopos contenidos en el medio hídrico, por ejemplo, los códigos LPGS, White y Eckerman, 1983, y RIVER-RAD, Hetrick, 1992, desarrollados en el Laboratoire National Oak Ridge que calculan dosis individuales y colectivas debidas a la contaminación de diferentes medios hídricos. Un código más completo, también desarrollado en EEUU, es el código DOGALI. DOGALI calcula dosis al individuo más expuesto, a la población en general y a la biota debida a efluentes líquidos procedentes de reactores de agua ligera (LWR) en operación normal. Se basa en los modelos hidrológicos recomendados en la R.G. 1.113, NRC^a, 1977, y las vías de exposición y dosimetrías recogidas en la R. G. 1.109, NRC^b 1977. Los modelos que contiene para determinar la dilución del contaminante son los siguientes: modelo de flujo en pistón, modelo de mezcla

completa y ambos modelos combinados. Así mismo, presenta un modelo en el que se puede considerar la actividad de fondo del medio hídrico en el momento que tiene lugar el vertido. En ningún caso considera la existencia de los procesos de difusión y dispersión.

La Comisión Europea ha auspiciado diferentes metodologías para el cálculo de dosis. Entre ellas se encuentran los códigos PC CREAM y RODOS.

El código PC CREAM está basado en la metodología CREAM (Consequences of Releases to the Environment: Assessment Methodology, European Commission, 1995) reconocida y auspiciada por la UE. El PC CREAM integra diferentes códigos que contemplan la transmisión de radionucleidos provenientes de reactores e instalaciones radiactivas por diferentes medios: atmósfera, acuático y cadena alimentaria. De estos códigos, el código RESUS calcula la dosis debida a radionucleidos contenidos en ríos. Este código considera tres tipos de modelos:

- *Modelo de dilución simple.* Se asume que el efluente, tan pronto como se produce la descarga, es diluido por el total del volumen del río. Este modelo no considera el intercambio con los sedimentos, el decaimiento del radionucleido, ni el tiempo de paso (la actividad a cualquier tiempo es la misma en todo el río, e igual a la inicial).
- *Modelos de mezcla.* Dentro de este grupo se integran a su vez dos modelos, Mezcla total y mezcla extendida. El modelo de mezcla total es semejante al de dilución simple, pero considera el decaimiento de los radionucleidos, el intercambio con los sedimentos y la distancia entre el punto de vertido y el punto donde se desea calcular la dosis. El modelo de mezcla extendida, además de lo enumerado para el modelo anterior, considera un factor de dilución que relaciona el caudal de efluente con el caudal de agua circulante por el río.
- *Modelos dinámicos.* Consideran la transferencia de materia, energía y cantidad de movimiento en el medio hídrico. Como el número de parámetros a introducir en estos modelos es muy alto, el código presenta la opción de utilizar un modelo empírico que es una simplificación del modelo completo. La simplificación está basada en el método desarrollado por Schaeffer, 1975.

En respuesta a las necesidades de una sociedad europea cada vez más sensibilizada ante los desastres producidos por el accidente de Chernobyl, el departamento de RTD, bajo los auspicios de la Comisión Europea, pone en marcha el proyecto RODOS (Real-Time On-Line Decisión Support System for Off-Site Emergence Management). El proyecto RODOS es mucho más que un código de cálculo de dosis y está diseñado como un protocolo de decisiones en el que se des-

criben todas las etapas que han de llevarse a cabo ante un accidente nuclear. El sistema ha sido diseñado como una herramienta que incorpora una serie de modelos y bases de datos para prevenir u evaluar las consecuencias de posibles accidentes y, de esta forma, mitigar sus efectos. Para ello se ha desarrollado un programa informático de intercambio y validación de datos que, uniformicen los planes de emergencia de toda Europa, Raskob, W. y Ehrhardt, J., 2002.

El sistema modular de RODOS facilita un protocolo de decisiones que actúa en cuatro niveles. Dentro del nivel 1 se realiza el análisis y predicción de futuras situaciones de emergencias radiológicas, por ejemplo, la distribución a lo largo del tiempo y del espacio de la concentración de radionucleidos en medios hídricos, terrestres o atmosféricos. La predicción se realiza con base en datos informatizados de los medios dispersantes, en datos meteorológicos y en los modelos implementados.

Dentro del subsistema ASY se encuentran recogidos los modelos que sirven para estimar, a lo largo del tiempo y del espacio, la transferencia de radionucleidos en las diferentes fases que se producen después de un accidente. Los modelos describen la fenomenología del transporte por escorrentía, modelos RETRACE, el transporte y la dispersión en ríos, RIVTOX, y el comportamiento de radionucleidos en lagos, COASTOX y LAKECO. Estos modelos describen múltiples escenarios y un gran número de sistemas hídricos por lo que el campo de aplicación es grande.

Además de los modelos descritos más arriba, en la actualidad se están desarrollando nuevos modelos que se implementaran en el sistema RODOS en un futuro y que ampliarán las utilidades del código. Son ejemplos de estos modelos el modelo DELTA/HYDRO y el modelo LATOX. El modelo DELTA/HYDRO se está desarrollando para simular la transferencia de radionucleidos solubles en aguas de ríos que discurren por topografías complicadas. El modelo incorpora las características físicas de los sistemas acuosos mediante la división del área de estudio en un área triangular, creada por el modelo DELTA/GAIA sobre la base de la elevación del terreno. Los parámetros más importantes del estudio son: pendiente del terreno, coeficiente de rugosidad del cauce, contenido en sólidos. El modelo LATOX se emplea en la modelización de lagos y embalses que pueden estar sujetos a estratificación. Considera las diferentes etapas de mezcla completa y de segmentación de la lámina de agua en embalses y lagos sujetos a estratificación. Contiene un submodelo que permite predecir el régimen hidrológico en función de datos meteorológicos. Es aplicable a largos periodos de tiempo que van desde pocos días hasta varios años.

En la actualidad, los modelos implementados en el sistema RODOS, son modelos que se han desarrollado, validado y probado en sistemas hídricos muy concretos del este de Europa, tabla 1.1.

lante denominado Tracer I) cuyo objetivo era la calibración del código CORVEL para los sistemas hidrológicos que pueden verse afectados por un vertido de las centrales nucleares españolas. La duración del proyecto fue de dos años (1 de agosto de 1997- 31 de julio de 1999) y su coste total fue de 182.707,68 euros. El trabajo realizado dentro del proyecto Tracer I, según se estipulaba en sus especificaciones técnicas, solo permitió realizar la calibración completa de los tramos de sistemas hidrológicos situados aguas abajo de las centrales nucleares de Trillo y José Cabrera. En consecuencia, para que el código CORVEL fuera completamente operativo, se formalizó un nuevo acuerdo específico de colaboración entre los mismos organismos involucrados en el proyecto Tracer I. El nuevo proyecto se denominó Tracer II y, en cuanto a su contenido, se le puede considerar una prolongación del primero. La duración del proyecto Tracer II fue de dos años y medio (1 de marzo de 2001- 31 de agosto de 2003) y su coste total fue de 202.048,37 euros.

2.1. Objetivos

Los objetivos propuestos para el proyecto Tracer (Tracer I y Tracer II) han sido dos:

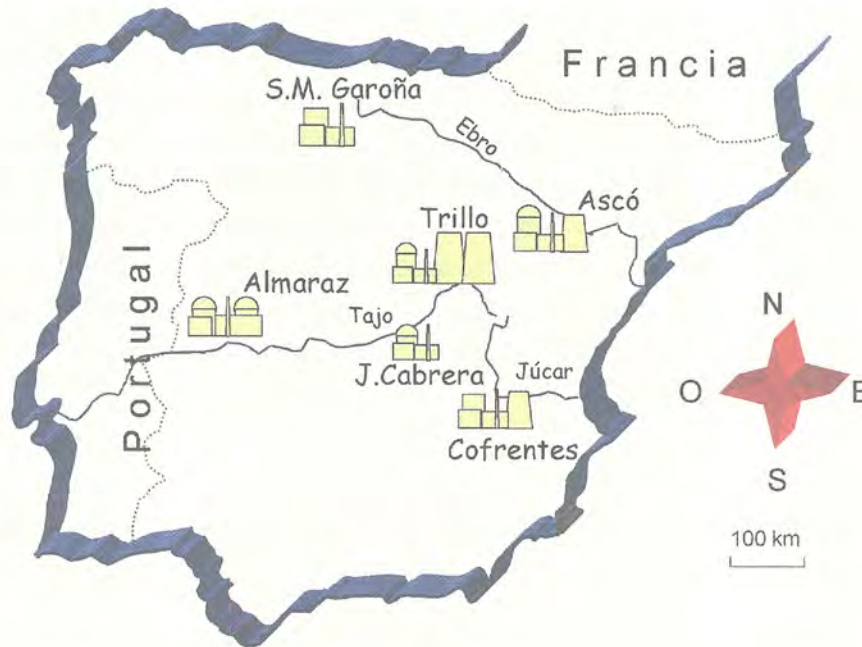
- Adaptar y calibrar el código CORVEL en los sistemas hidrológicos que podrían ser afectados por un vertido de las siguientes centrales nucleares: Santa María de Garoña, Ascó, Trillo, José Cabrera, Almaraz y Cofrentes. La adaptación y calibración cumplirá con los siguientes requisitos: 1) debe ser capaz de modelizar vertidos accidentales; y 2) requerirá del usuario muy pocos datos sobre su ejecución, con el fin de hacer posible su utilización desde la Sala de Emergencias (Salem) del CSN en tiempo real.
- Realizar las modificaciones que sean necesarias en el código CORVEL para conseguir una interfaz más “amigable” para el usuario. Si bien el objetivo inicial era la elaboración de una nueva interfaz para el código, a lo largo del desarrollo del trabajo se ha evidenciado que el código CORVEL podía ser mejorado, además de en su interfaz, en otros aspectos. Por todo ello, durante el desarrollo del proyecto, se incluyó un nuevo objetivo que consistía en introducir en el código las modificaciones necesarias para dotarle de mayor operatividad, velocidad de cálculo, y mayores prestaciones para el usuario.

2.2. Centrales nucleares y sistemas hidrológicos

En el proyecto Tracer se han estudiado los sistemas hidrológicos de aguas superficiales continentales que pueden verse afectados por vertidos de las centrales nucleares españolas. Los sistemas hidrológicos que pueden verse afectados por vertidos de centrales nucleares son los sistemas hidrológicos de los ríos Ebro, Tajo

y Júcar. En la figura 1.4 se muestra la ubicación de las centrales nucleares españolas y los sistemas hidrológicos en que se encuentran instaladas.

Figura 1.4.
Situación
de los sistemas
hidrológicos objeto
de estudio



2.2.1. Cuenca del río Ebro

En la cuenca del río Ebro se encuentran instaladas dos centrales nucleares: Santa María de Garoña y Ascó. La primera se sitúa en la cuenca alta del río, mientras, que la segunda lo hace en su cuenca baja.

La central nuclear Santa María de Garoña se halla situada en el valle de Tobalina, término municipal de Barcina del Barco (Burgos). Pertenece a la primera generación de centrales nucleares y entró en funcionamiento en mayo de 1971. El titular de la explotación es Nuclenor. La central nuclear consta de un reactor de agua ligera a ebullición (BWR), de 1.381 MW de potencia térmica y 460 MW de potencia eléctrica. El suministrador del sistema nuclear de suministro de vapor es General Electric Co. La demanda de agua de la central nuclear es de $24,36 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El sistema de refrigeración del condensador es abierto al embalse de Sobrón (río Ebro). Por lo tanto un vertido de la central nuclear podría afectar a los tramos del río Ebro situados aguas abajo de dicho embalse.

El tramo del río Ebro en el que se ha realizado el estudio forma parte de la cuenca alta y media del río Ebro y se extiende desde el embalse de Sobrón hasta la cola del embalse del Cortijo, figura 1.5. El sistema hidrológico está compuesto por diferentes embalses de mayor o menor capacidad, tramos de río con circulación de agua y canales de alimentación a centrales hidroeléctricas.

El bloque de Modelización y Cálculo se constituye con diferentes modelos físico-matemáticos de transporte y mezcla en sistemas hidrológicos del mismo tipo que los recomendados por la US Nuclear Regulatory Commission, 1977. En este bloque se incluyen las herramientas de cálculo necesarias para la caracterización hidráulica y de dispersión de los medios considerados.

Al bloque de Modelización y Cálculo le llegan dos tipos de información, una almacenada en la Base de Datos y otra como información obtenida en tiempo real. La información almacenada en la Base de Datos está constituida por características hidráulicas y de dispersión de los sistemas hidrológicos y debe obtenerse por calibración de dichos sistemas. En las figuras 1.2 y 1.3 se muestra la información almacenada en la Base de Datos cuando el sistema considerado es un río o un embalse, respectivamente. Para los tramos de ríos, y a partir de la información obtenida en la caracterización y de los resultados obtenidos en campañas de campo, se deben obtener los siguientes parámetros, figura 1.2: anchura superficial, área transversal y profundidad hidráulica del río, parámetros estadísticos de curvas concentración-tiempo y coeficientes de dispersión que se deben obtener de campañas de trazador y la variación de estos parámetros con la longitud del tramo objeto de estudio. Así mismo, la base de datos contiene información sobre los márgenes de error con que se realiza la predicción. Toda esta información se debe implementar en la base de datos del código dentro del grupo Dt ríos.

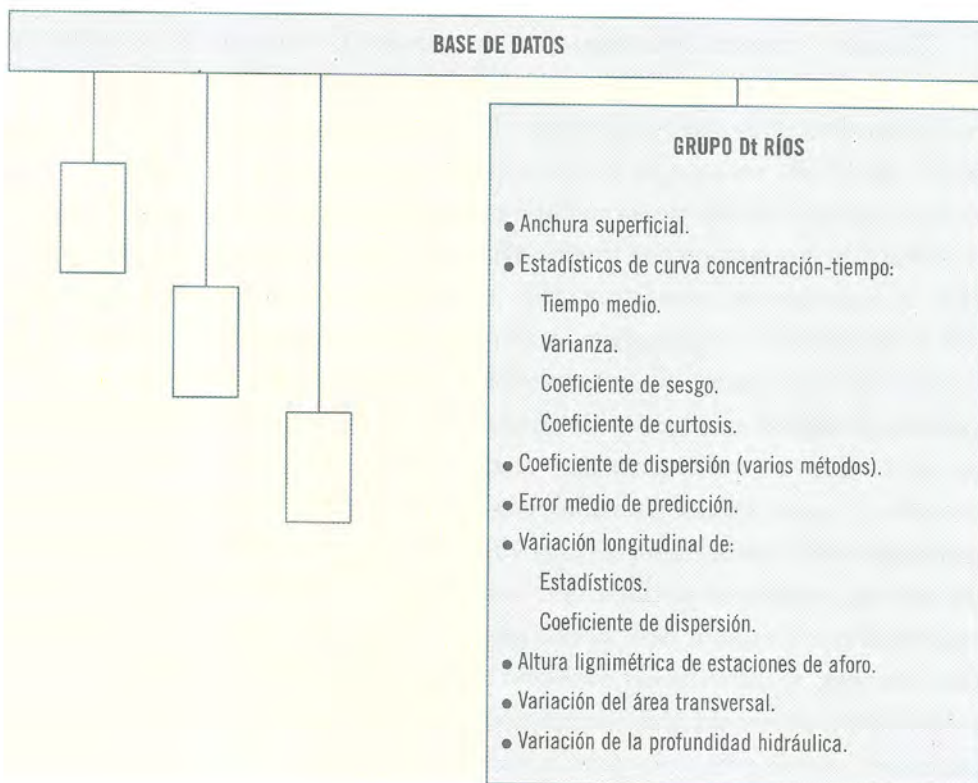
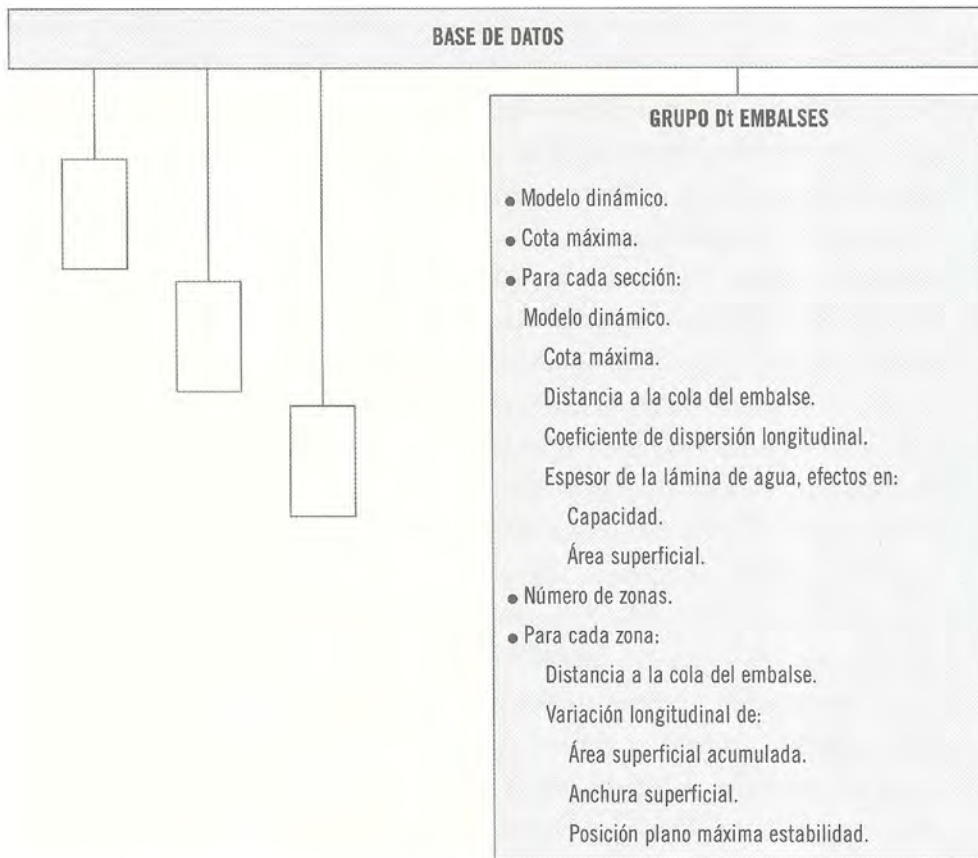


Figura 1.2. Parámetros requeridos por el código CORVEL para la caracterización de tramos de ríos

Figura 1.3. Parámetros requeridos por el código CORVEL para la caracterización de embalses



Cuando el sistema hidrológico es un embalse, la información requerida se encuentra almacenada en el grupo Dt embalses, figura 1.3. El código es capaz de modelizar diferentes comportamientos de la lámina de agua de los embalses o de secciones de éste, en aquellos casos en que el embalse no sea uniforme a lo largo de su longitud. Por ejemplo, el embalse puede estar sujeto a estratificación natural o artificial lo que supone una fragmentación de la columna de agua y una reducción del volumen útil para la diluición y dispersión del vertido que podrá viajar por la epilimnion o hipolimnion, o bien presentar homogeneidad vertical en la columna de agua. Así mismo, se contemplan otros comportamientos como la recirculación de vertido aguas arriba del avenamiento de la descarga. Para la asignación de un modelo u otro es necesario realizar la caracterización experimental del embalse. El grupo Dt embalses almacena también diferentes parámetros de flujo y geométricos del embalse: cota máxima, distancia del inicio de cada sección a la cola del embalse, coeficiente de dispersión longitudinal, variación de la capacidad y área superficial con el espesor de la lámina agua, y, si el embalse está sujeto a estratificación, también se debe incluir variación del área superficial acumulada, anchura superficial y posición del plano de máxima estabilidad con la longitud del embalse y las fechas de inicio y fin de la estratificación.

Escenario	Modelo aplicado	Sistema hídrico	Estado de desarrollo
Deposición en la captación	RETRACE-1. Desagüe	Captación en el río Rin	Validado
Transferencia temprana	RIVTOX 1D. Río	Captación en el Vah/Dudvad	+
	LAKECO. Lago		Integrado
	COASTOX 2D. Embalse		
Liberación directa de agua	COASTOX 2D. Río	Río Rin	Validado
Transferencia temprana	COASTOX 2D. Lago	Río Dnieper	+
	RIVTOX 1D. Río	Río Vah/Dudvah	Integrado
	LAKECO. Lago		
Transferencia media y prolongada	RETRACE-1. Escorrentía	Río Rin	Validado
	RIVTOX 1D. Río	Río Dnieper	+
	LAKECO. Lagos (modelo de compartimentos)	(incluidos embalses)	Integrado
	WATOX. Río (modelo de compartimentos)		Comprobado
	RETRACE-3. Escorrentía		Comprobado
	RETURB. Escorrentía (urbanos)		Comprobado
Estudios especiales (Hidro-herramientas)	RIVMORPH 2D. Río	Bielorrusia	Comprobado
	THREETOX 3D. Lagos profundos, embalses, estuarios, zonas costeras	Embalse de enfriamiento	Comprobado
	LATOX. Lagos y zonas costeras (mod. de caja para sist. estratificados)	Zhaporozhe	Comprobado
	VADZONE. Transferencia rápida del suelo a las aguas subterráneas	-	Comprobado
	SUSTOX 1D/2D/3D. Aguas subterráneas	-	Comprobado
	WATOX. Río	-	Comprobado
	GROWTOX 1D/2D. Aguas subterráneas	-	Comprobado
	DELTA/HYDRO. Áreas montañosas	-	Comprobado

Tabla 1.1. Modelos hidrológicos incluidos en el módulo hidrológico y sus aplicaciones en RODOS, versión PRY 4.0

En España, el CSN ha auspiciado el desarrollo del código CORVEL, Sánchez et al., 2000 y Palancar et al., 2001. Este código es el único código que se ha desarrollado para la predicción de la evolución de la actividad en medios hídricos continentales que pueden verse afectados por vertidos de las centrales nucleares españolas.

1.1. Código CORVEL

Los sistemas hidrológicos, ríos, lagos y embalses, presentan dinámicas complejas y muy variables, por lo que no resulta posible predecir su comportamiento con modelos generalizados, si no que deben ser modelos específicos que recojan cada una de sus peculiaridades en cuanto a características de flujo y transferencia de materia y energía.

Debido a ello, el CSN, en 1994, impulsó el desarrollo del código CORVEL. El código CORVEL (Cálculo de CONcentraciones en tiempo Real de radioisótopos contenidos en Vertidos Líquidos accidentales en aguas superficiales) realiza predicciones en forma de curvas concentración-tiempo de la evolución longitudinal de vertidos líquidos en medios hídricos superficiales. Este código fue elaborado en el Departamento de Ingeniería Química de la UCM como principal objetivo de una beca de formación dotada por el CSN (septiembre 1994-septiembre de 1996).

La estructura y utilidades del código CORVEL, Sánchez et al., 1998, Sánchez et al., 2000 y Palancar et al., 2001, se muestran en la figura 1.1. El código está estructurado en tres bloques: Base de Datos, Modelización y Cálculo y Presentación de Resultados.

Figura 1.1. Metodología y estructura del código Corvel

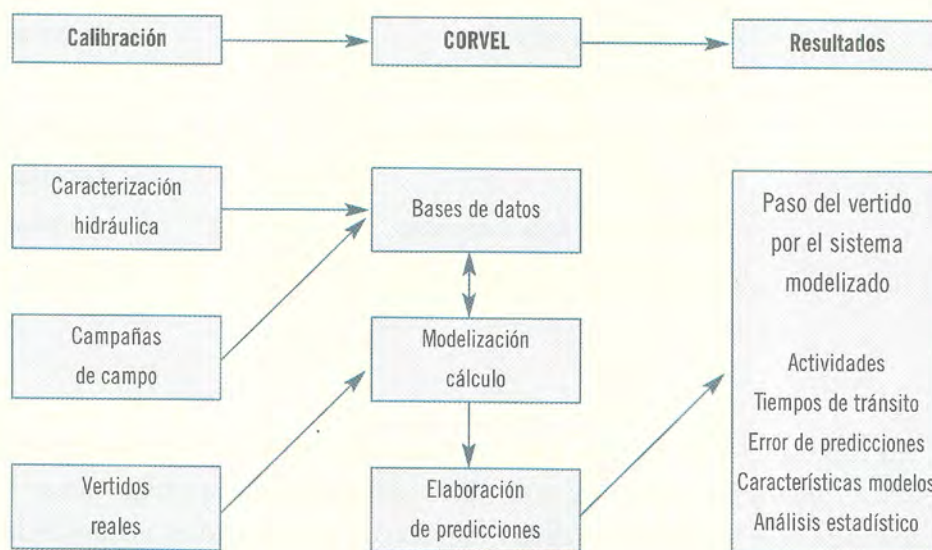




Figura 1.5.
Tramo del río
Ebro bajo la
influencia de la
central nuclear
Santa María de
Garoña

La central nuclear de Ascó se encuentra situada en el término municipal de Ascó (Tarragona). Pertenece al grupo de centrales de segunda generación. Las empresas explotadoras son Endesa-G e Iberdrola-G. La central nuclear consta de dos unidades, cada una con un reactor de agua ligera a presión (PWR) y una potencia eléctrica de 930 MW. La unidad I entra en funcionamiento en el año de 1983, mientras que la unidad II lo hace en el año de 1985. El suministrador del sistema nuclear de suministro de vapor es Westinghouse. El sistema de refrigeración del condensador es de lazo abierto con torres de refrigeración. En las unidades de la central nuclear de Ascó, el agua se toma del río Ebro y adicionalmente dispone entre el condensador y la descarga, de dos baterías en paralelo de torres de refrigeración de tiro forzado y una torre de refrigeración de tiro natural. Con la finalidad de asegurar que la temperatura del agua descargada respete el límite autorizado, las torres de refrigeración actúan cuando el descenso del caudal del río lo impone. La demanda de agua de la central nuclear es de $72,30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

El agua utilizada en la refrigeración es tomada de un azud construido, exclusivamente para este fin, aguas abajo del embalse de Flix (río Ebro) y es devuelta al río Ebro, aguas abajo del citado azud.

Aguas abajo del avenamiento del canal de descarga de la central nuclear no existen impedimentos para la circulación del agua, salvo el azud de Cherta. Por lo tanto, el tramo del río Ebro, que puede verse afectado por un vertido de la central nuclear de

Ascó, figura 1.6, se trata de un tramo de río en el cual el agua circula en régimen de regulación. El caudal circulante se encuentra regulado por los embalses de Ribarroja y Mequinenza, situados aguas arriba del embalse de Flix. Al no existir elementos de retención de agua, un vertido de la central nuclear podría viajar hasta la desembocadura del río. Por ello el estudio se ha centrado en el tramo comprendido entre la descarga de la central nuclear y la ciudad de Amposta, situada al principio del Delta del Ebro.

Figura 1.6.
Tramo del río Ebro bajo la influencia de la central nuclear de Ascó



2.2.2. Cuenca del río Tajo

En la cuenca del río Tajo se encuentran instaladas tres centrales nucleares: Trillo, José Cabrera y Almaraz. Las dos primeras se sitúan en la cuenca alta del río, mientras, que la tercera lo hace en su cuenca media, figura 1.7.

La central nuclear de Trillo se encuentra situada en el término municipal de Trillo (Guadalajara). Pertenece al grupo de centrales de tercera generación. Las empresas explotadoras son Iberdrola-G, Unión Fenosa-G, Hidroeléctrica del Cantábrico y Nuclenor. La central nuclear consta de un reactor de agua ligera a presión (PWR) de tecnología alemana Siemens- KWU, con una potencia instalada de 1.066 MW. La unidad entra en funcionamiento en agosto de 1988. La demanda de agua de la central nuclear es de $44,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El sistema de refrigeración del condensador es de lazo

La información en tiempo real es suministrada por el usuario del código e incluye las características del vertido, inventario y tasa, y el estado hidrológico del sistema, nivel de la lámina de agua, cuando el sistema afectado es un río, y de la cota superficial y caudal de operación si el sistema es un embalse. Con el fin de facilitar esta labor, en la Base de Datos se encuentran recogidos los nombres y números de teléfono de los centros de control donde el operador puede recopilar esta información.

Mediante el código CORVEL se pueden realizar predicciones en forma de curvas de concentración-tiempo de emisiones con tasa de vertido variable. El posterior análisis de estas predicciones permite conocer cuatro factores esenciales: tiempo de llegada del frente, tiempo de tránsito o duración de la exposición, concentración de actividad máxima y tiempo a que se produce dicho máximo.

El código CORVEL ha sido diseñado para suministrar dos tipos de información: información de uso inmediato e información de análisis de eventos. En el primer caso, la información es la estrictamente necesaria para la toma de decisiones en tiempo real, durante un vertido accidental; en el segundo, la información es mucho más profusa y permite un estudio más detallado de la evolución del vertido real o de vertidos simulados en diferentes escenarios, útil en el estudio metodológico y sistemático de posibles vertidos y sus consecuencias. Independientemente de la opción elegida, la presentación de resultados se realiza mediante tablas, gráficas, informes y archivos de datos.

2. PROYECTO TRACER

La modelización de la evolución de la actividad en el medio hídrico exige la aplicación de modelos conceptuales. El modelo conceptual puede ser considerado como el conjunto de hipótesis que describen los procesos físicos y químicos que afectan al comportamiento del sistema. El modelo conceptual se plasma en ecuaciones matemáticas que, posteriormente, son implementadas en herramientas informáticas. Los modelos conceptuales, que en principio deben ser lo más simples posible, deben representar de una forma eficaz la realidad que es un proceso muy complejo.

La incertidumbre asociada a la modelización puede ser de tres tipos.

- Asociada al modelo conceptual, debido a un conocimiento incompleto del sistema y de los procesos que en él tienen lugar.
- Asociada al modelo matemático, debido a las simplificaciones que siempre supone expresar el modelo conceptual en ecuaciones matemáticas.
- Asociada a la exactitud de la medida de los parámetros del modelo y a la imprevisión de los cambios que puedan sufrir debido a las condiciones del sistema.

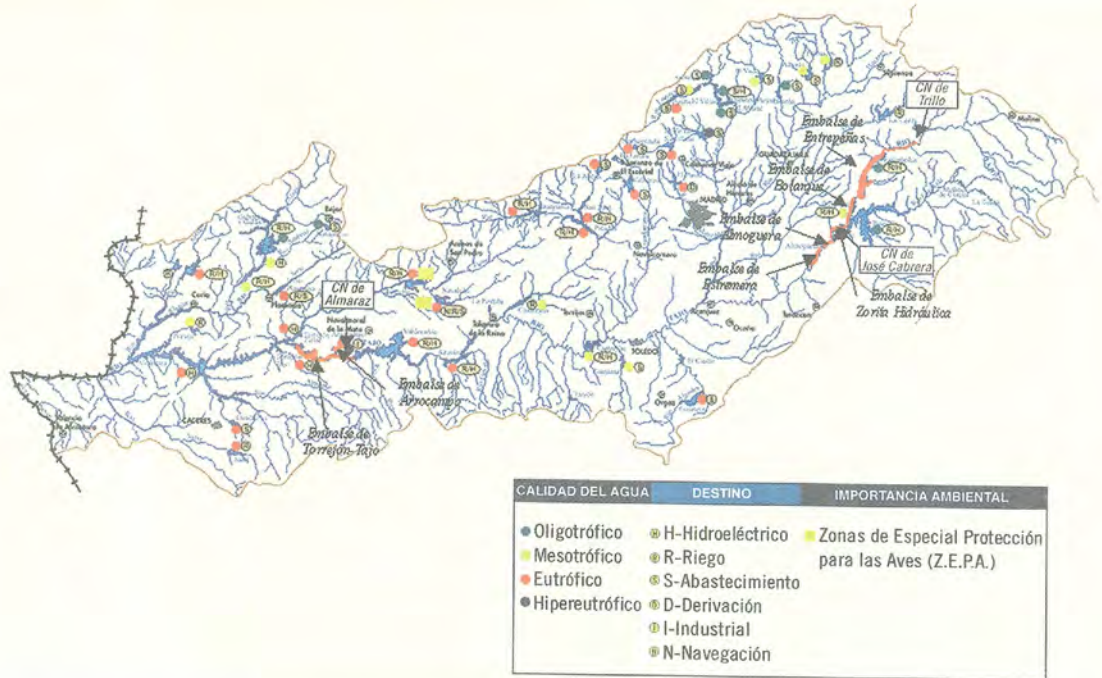
Para prever o corregir las incertidumbres de la modelización es necesario disponer de datos reales que permitan por una parte, determinar los mecanismos que controlan la evolución de la actividad del vertido en el medio hídrico y calcular los parámetros contenidos en los modelos matemáticos que se emplean en la modelización, y por otra evaluar la exactitud de la predicción.

Por lo tanto, el control de la calidad del agua y la predicción de los efectos que los contaminantes vertidos tienen en un sistema hidrológico sólo pueden basarse en un profundo conocimiento del mismo. Desdichadamente, los ríos y los embalses presentan dinámicas complejas y muy variables, por lo que no resulta posible predecir su comportamiento si no se ha realizado previamente una laboriosa tarea experimental. Estos estudios resultan de vital importancia para determinar los riesgos asociados a posibles vertidos de centrales nucleares, accidentales o rutinarios, que pueden adquirir especial importancia en un país de recursos hídricos tan limitados y variables como España.

Un último aspecto que conviene destacar es la aplicabilidad de los códigos desarrollados para la realización de predicciones. El código desarrollado debería servir para realizar predicciones en tiempo real de vertidos actuales, que están teniendo lugar en el momento de la predicción, o bien, simulaciones de vertidos potenciales. La primera aplicación tendría por objeto permitir conocer con antelación la evolución de la actividad del medio hídrico. Ello permitiría a los técnicos y responsables de los organismos competentes tomar las decisiones de seguridad nuclear adecuadas. En este caso, el código debe presentar alta rapidez de cálculo y requerir al usuario la menor cantidad de información posible. La segunda aplicación serviría para la formación de personal. La realización de simulaciones de vertidos potenciales permitiría ampliar la experiencia y profundizar en el conocimiento del usuario sobre el comportamiento de vertidos en el medio hídrico. En esta aplicación, el código debe permitir trabajar con un amplio abanico de modelos, características de vertido y condiciones del sistema hidrológico. En ambos casos y como en cualquier otra aplicación informática el usuario debe comunicarse con el código mediante una interfaz lo más amigable posible.

Con base en el análisis que se ha realizado en párrafos anteriores, el CSN impulsó la realización de un proyecto de investigación, el proyecto Tracer, cuyos objetivos fundamentales eran el estudio de la dinámica del medio hídrico en que se emplazan las centrales nucleares españolas y la calibración y adaptación del código CORVEL desarrollado con anterioridad.

En julio de 1997, el Consejo de Seguridad Nuclear, la Universidad Complutense de Madrid (Departamento de Ingeniería Química) y el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (Área de Aplicaciones Isotópicas) formalizaron un acuerdo específico de colaboración para la realización del proyecto Tracer (en ade-



abierto con torres de refrigeración natural. El agua utilizada en la refrigeración es tomada del embalse de La Ermita (río Tajo) y vertida al río Tajo a pie de presa del mismo embalse.

La zona de influencia de la central nuclear de Trillo abarca un tramo de sistema hidrológico de cierta complejidad que se extiende entre la presa del embalse de la Ermita y la presa del embalse de Bolarque.

La central nuclear José Cabrera se encuentra situada en el término municipal de Almonacid de Zorita (Guadalajara). Pertenece al grupo de centrales de primera generación. La empresa explotadora es Unión Fenosa-G. La central nuclear consta de un reactor de agua ligera a presión (PWR) de Westinghaus, con una potencia instalada de 510 MW de potencia térmica y 160 MW de potencia eléctrica. La unidad entra en funcionamiento en el año 1968. La demanda de agua de la central nuclear es de $6,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El sistema de refrigeración del condensador es de lazo abierto con torres de refrigeración forzada. El agua utilizada en la refrigeración es tomada del embalse de Zorita Hidráulica (río Tajo) y vertida al río Tajo en el propio embalse, aguas debajo de la toma de agua.

El tramo del río Tajo que se considera y puede verse afectado por un vertido de la central nuclear José Cabrera se extiende desde la cola del embalse de Zorita Hidráulica y la presa del embalse de Estremera.

La central nuclear de Almaraz se encuentra situada en el término municipal de Almaraz (Cáceres). Pertenece al grupo de centrales de segunda generación. Las empresas explotadoras son Endesa, Iberdrola-G y Unión Fenosa-G. Consta de dos unidades

Figura 1.7. Tramos del río Tajo bajo la influencia de las centrales nucleares de Trillo, José Cabrera y Almaraz

de reactores de agua ligera a presión (PWR) de tecnología Westinghaus, con una potencia térmica instalada de 2.696 MW (térmicos) y 930 MW de potencia eléctrica. La unidad I entra en funcionamiento en el año de 1981, mientras que la unidad II lo hace en el año 1983. La demanda de agua de la central nuclear es de $92,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El sistema de refrigeración del condensador es de lazo abierto al embalse de Arrocampo.

El embalse de Arrocampo toma y vierte agua al embalse de Torrejón-Tajo. El embalse de Torrejón-Tajo esta construido en el cauce del río Tajo. El tramo del sistema hidrológico objeto de estudio es el conjunto formado por el embalse de Arrocampo y el embalse de Torrejón-Tajo.

2.2.3. Cuenca del río Júcar

En la cuenca del río Júcar se encuentra instalada la central nuclear de Cofrentes.

La central nuclear de Cofrentes se encuentra situada en el término municipal de Cofrentes (Valencia). Pertenece al grupo de centrales de segunda generación. La empresa explotadora es Iberdrola-G. Consta de un reactor de agua ligera a ebullición (BWR) de tecnología General Electric Co., con una potencia térmica de 2.952 Mw (térmicos) y 1.025 MW de potencia eléctrica. La central nuclear entra en funcionamiento en 1984. La refrigeración de la planta se consigue con dos torres de tiro natural. El agua requerida para el funcionamiento de la central nuclear se obtiene del embalse de Embarcaderos, embalse al que también se retorna el agua sobrante.

El embalse de Embarcaderos se encuentra construido sobre el cauce del río Júcar, aguas abajo del avenamiento del río Cabriel. En la actualidad la presa del embalse de Embarcaderos se encuentra sumergida de forma que el agua que contiene este embalse forma un solo cuerpo con la contenida en el embalse de Cortes II. Por lo que el estudio se ha centrado en ambos embalses, figura 1.8.

Figura 1.8. Tramo del río Júcar bajo la influencia de la central nuclear de Cofrentes



2.3. Estructura

La última finalidad del proyecto Tracer es adaptar y calibrar el código CORVEL. La adaptación del código CORVEL implica diseñar e implementar modelos específicos para cada uno de los sistemas hidrológicos objeto de estudio. Los modelos implementados deben contemplar las características individuales de cada sistema hidrológico, lo cual implica realizar una caracterización exhaustiva de cada uno de ellos. Esta caracterización supone conocer las características hidrológicas e hidráulicas del sistema, así como sus propiedades de dilución y de dispersión de materia y energía.

La variada naturaleza de la información requerida ha hecho que el trabajo a desarrollar sea de diferentes tipos. Así el trabajo se puede dividir en cuatro tipos de tareas, figura 1.9.

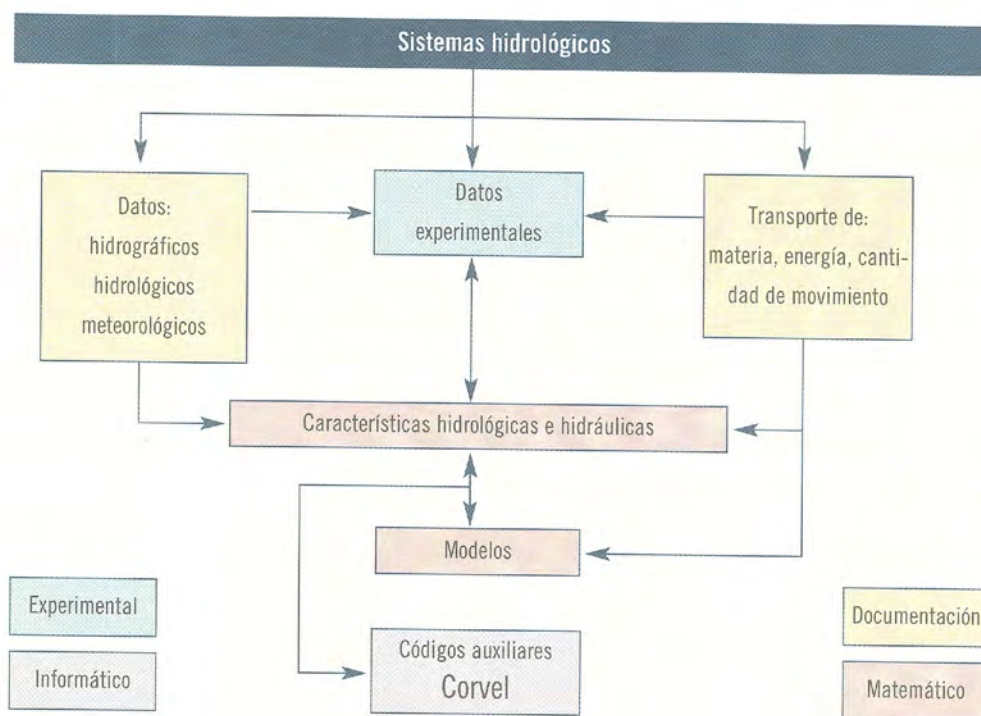


Figura 1.9. Estructura del proyecto TRACER

- Documental.
- Experimental.
- Matemática.
- Informática.

En la tarea de documentación se ha realizado una recopilación de información, hidrográfica, hidrológica y meteorológica de los sistemas hidrológicos objeto de estudio y una revisión bibliográfica sobre la modelización del transporte de materia, energía y cantidad de movimiento en masas de agua continentales. La información conseguida, permitió, por una parte, seleccionar las variables a medir en cada sistema hidrológico y realizar una planificación de las campañas de campo y, por otra, obtener una caracterización completa de cada uno de los sistemas hidrológicos.

La tarea experimental ha consistido en realizar campañas de campo en las que se han utilizado diferentes técnicas experimentales para obtener información de la evolución, en el espacio y en el tiempo, de diferentes variables características del sistema hidrológico objeto de estudio.

El tratamiento matemático de los resultados de la tareas experimental y documental permitió conocer las características geométricas, hidrológicas, hidráulicas y propiedades de dilución y de dispersión de materia y energía del sistema y realizar la modelización de los sistemas hidrológicos que pueden verse afectados por vertidos de las centrales nucleares.

El trabajo informático ha consistido en el diseño y construcción de una nueva interfaz, una nueva base de datos y el software necesario para dotar de mayores prestaciones al código CORVEL. Así mismo, se ha realizado la traducción del código inicial (CORVEL) del lenguaje Basic al lenguaje Visual Basic, lenguaje utilizado en el nuevo código. También se ha introducido nueva información en la base de datos del código y se han implementado nuevos modelos dinámicos que eran necesarios para poder simular el comportamiento de algunos sistemas hidrológicos. La tarea informática, también, incluye el desarrollo de códigos auxiliares para el cálculo de diferentes parámetros requeridos por la modelización de los sistemas hidrológicos.

Documentación de sistemas

Este apartado contiene una descripción de las características hidrográficas e hidrológicas de los sistemas estudiados, así como de las condiciones externas a las que están sometidos y que condicionan de forma fundamental su comportamiento dinámico.

En el apartado se recoge un resumen de los resultados de la tarea de documentación y se estructura de la siguiente forma. En primer lugar se realiza la descripción hidrográfica e hidrológica de los sistemas estudiados. A continuación se realiza un análisis de las condiciones externas a las que está sometido cada uno de los sistemas hidrológicos.

1. DESCRIPCIÓN HIDROGRÁFICA E HIDROLÓGICA

El objetivo de la descripción es recopilar toda la información necesaria para planificar las campañas de medida, para la elaboración de la Base de Datos del código y para la modelización del sistema.

La caracterización exige recopilar información sobre.

- Localización de puntos de consumo de agua, centrales nucleares, tipos de regímenes de flujo de agua (tramos de río o embalses), bifurcaciones y avenamientos de canales y afluentes. Así como, una descripción de los accesos a determinados puntos y enclaves.
- Gastos de agua puestos en juego en los citados enclaves e identificación de aquellos que desempeñan el papel más importante en el control del caudal en los tramos estudiados y estado de llenado de embalses.
- Datos de batimetría, curvas de gasto, datos de aforo mecánico, alturas limnimétricas, pendientes de las líneas de energía de la superficie del agua y la presencia de obstáculos, e irregularidades importantes en el cauce del río (zonas de remanso y todo aquello que pueda suponer reconcentración o paso preferente de contaminantes).
- Ecuaciones de ajuste de parámetros geométricos en función de la profundidad y de la distancia a la cola del embalse, en aquellos tramos que están constituidos por embalses.
- Características de los aportes de agua.

En cada tramo de sistema hidrológico se han seleccionado unos puntos de interés, que serán para los que el código realice predicciones de la distribución de concentración del vertido. Los puntos de interés se han seleccionado en función de la presencia de puntos de consumo de agua y de estructuras que puedan originar cambios en el comportamiento del sistema o bien por la existencia de zonas de esparcimiento.

En aquellos tramos de sistemas hidrológicos constituidos por embalses, ha sido necesario ajustar diferentes parámetros geométricos a polinomios con el espesor de la lámina de agua y con la distancia a la cola del embalse. Los parámetros ajustados han sido: volumen de agua, área superficial y acumulada, anchura superficial de la lámina de agua. Todas las curvas se han calculado a partir de la batimetría que contiene los XYZT del embalse, proporcionados por organismos públicos y empresas explotadoras del embalse y cartografía del Centro Nacional de Información Geográfica o del Ejército, de escala 1:25.000. Así mismo, ha sido necesario medir las distancias entre los puntos de interés y el origen de los vertidos.

La información requerida se ha obtenido por diferentes vías: reconocimiento sobre el terreno de los sistemas hidrológicos e información obtenida de las campañas de campo realizadas, consultas de cartografía del Centro Nacional de Información Geográfica o del Ejército, escalas 1:25.000 o 1:50.000, y consultas a diferentes organismos públicos y empresas explotadoras de las centrales nucleares y centrales hidroeléctricas instaladas en los sistemas hidrológicos. Los organismos públicos y empresas consultados han sido:

- Confederación Hidrográfica del Tajo.
- Confederación Hidrográfica del Ebro.
- Confederación Hidrográfica del Júcar.
- Ministerio de Fomento.
- Ministerio de Medio Ambiente.
- Iberdrola.
- Unión Fenosa.
- Nuclenor.

La descripción se ha organizado por las cuencas hidrográficas en que se encuentran comprendidos los tramos estudiados y dentro de estas en función de las centrales nucleares ubicadas en cada tramo. En esta memoria se recoge un resumen general de la información recopilada.

1.1. Cuenca del río Ebro

En la cuenca del río Ebro se encuentran instaladas dos centrales nucleares Santa María de Garoña y Ascó.

1.1.1. Central nuclear Santa María de Garoña

La central nuclear Santa María de Garoña utiliza como foco frío el embalse de Sobrón. Como posible zona de influencia de esta central nuclear se ha considerado el tramo de río Ebro comprendido entre la cola del embalse de Sobrón y la cola del embalse del Cortijo, figura 1.5. El tramo está constituido por una sucesión de embal-

ses, cuyas características se muestran en la tabla 2.1, tramo de río en los que el agua fluye con régimen de caudal regulado y de canales de servicio de centrales hidroeléctricas instaladas en la zona. El caudal se encuentra regulado por el embalse del Ebro, aunque puede sufrir variaciones por aportes intermedios. En lo siguiente se considerará que este tramo se encuentra dividido en cuatro subtramos, los mismos considerados en el código:

- Embalse de Sobrón.
- Embalse de PuenteIarrá.
- Embalse de Cabriana.
- Ebro medio.

Tabla 2.1.
Características de los embalses objeto de estudio

Nombre	Municipio Provincia	Coord. Presa (UTM)	Compañía Explotación	Sup. Cuenca (km ²)	Aportes (1)	Cota máx. (m.s.n.m.)	Cota mín. (m.s.n.m.)	Volum. total (hm ³)
Sobrón	Lantarón Álava	04-9180/ 47-3520	Iberdrola	4.670	Ebro Oca Nela Jerea	511	480	20
PuenteIarrá	Lantarón Álava	04-9610/ 47-3480	Iberdrola	5.038	Ebro Omecillo	483	472	1,5
Cabriana	Miranda Ebro Burgos	05-0180/	Iberdrola	5.336	Ebro	464	458	1,65
Molino Viejo	Briñas Logroño	05-1398/ 47-1671	Centrales Eléctricas, S.L.	-	Ebro Bayas Zadorra Oja	Cota+3,49	cota	-
Entrepeñas	Auñón Guadalajara	05-135/ 44-8280	Unión Fenosa	3.929	Tajo	720.56	675	890
Bolarque	Pastrana Guadalajara	05-1550/ 44-6825	Unión Fenosa	10.686	Tajo Guadiela	642	636,15	30,7
Zorita Hidráulica	Zorita de los Canes Guadalajara	05-0892/ 44-6635	Unión Fenosa	7.530	Tajo	600	598	2,6
Almoguera	Almoguera Guadalaja	05-0368/ 44-5838	Unión Fenosa	7.880	Tajo	585	583	6,5
Estremera	Drieves Guadalajara	04-9947/ 44-5057	Estado	7.910	Tajo	565.5	563,65	0,5
Arrocampo	Romangordo Cáceres	02-6585/ 44-0751	Central nuclear de Almaraz	97	Torrejón- Tajo	255	235,8	35,5
Torrejón- Tajo	Torrejón El Rubio Cáceres	02-4455/ 44-1375	Iberdrola	37.073	Tajo Tiétar	242,5	200	166
Cortes II	Cortes de Pallás Valencia	06-7969/ 43-4807	Iberdrola	17.144	Júcar Cabriel	330	314	117,76

(1) Se consideran los afluentes más importantes que avanan en el tramo entre dos embalses consecutivos

Embalse de Sobrón

La morfología del embalse es variada. En la zona alta, el embalse se ajusta al cauce del río. Aguas abajo de la hoz de Garoña, se ensancha hasta alcanzar 300 m de anchura. A la entrada del desfiladero del Sobrón, el embalse se estrecha y se encaja entre paredones calizos. A unos 200 m de la presa vuelve a ensanchar alcanzado unos 250 m de anchura.

El caudal se encuentra regulado por el embalse del Ebro, aunque junto con la de éste, recoge también las aportaciones de los ríos Oca, Nela y Jerea, además de todos los barrancos secundarios, que a él afluyen, desde Palazuelos hasta Sobrón. Hay establecidas estaciones de aforo en Riosequillo, sobre el río Ebro, con escala y curva de aforos; en Nofuentes, sobre el río Nela, igual que la anterior; en Oña, sobre el río Oca y en Palazuelos sobre el Jerea y finalmente en el paraje denominado el Estreño sobre el río Ebro, que recoge todos los aforos anteriores, excepto el caudal derivado de la presa de Cillaperlata para la central hidroeléctrica de Quintana. Hay instaladas también, escalas en Espinosa de los Monteros sobre el río Trueba; en Bercedo sobre el río Cerneja y Santelices sobre el río Nela. Los dos primeros ríos son afluentes del río Nela.

La aportación media anual es de 1.550 hm³, lo que supone una tasa de renovación de una vez cada 20 días con caudales mínimos y de 5 días por término medio. La cota del embalse fluctúa muy poco.

La presa del Sobrón no deja caudal ecológico continuo, pero en verano vierte 10 m³ s⁻¹ por aliviadero durante 20 minutos al día. Durante el resto del año, la presa vierte en época de lluvias cuando las aportaciones superan 80 m³ s⁻¹; este tipo de vertidos se realiza una media de 80 días al año. Por tanto, en condiciones normales, el cauce del río queda cubierto por una fina película de agua, resultado de los aportes de pequeñas fuentes y surgencias y el agua embalsada por la presa de Sobrón se descarga mediante un túnel hasta las turbinas de la central hidroeléctrica del mismo nombre. El caudal máximo turbinado por dicha central hidroeléctrica es de 80 m³ s⁻¹.

En sus márgenes se encuentran ubicadas las siguientes localidades: Pangusión, Cuezva, Barcina del Barco, Solomera, Sta. María de Garoña y Tobalilla. En la tabla 2.2 se recogen dichas localidades y se indica el municipio al que pertenecen.

La central nuclear Santa María de Garoña se encuentra situada en una península, formada por uno de los meandros del embalse, a 12.100 m aguas arriba de la presa de éste y a 6.500 m de su cola. De las poblaciones situadas en las márgenes del embalse, las de Pangusión y Cuezva se encuentran suficientemente alejadas de la central nuclear para que la masa de agua en estos puntos se vea afectada por la descarga de dicha central nuclear. Barcina del Barco se encuentra situada enfrente

Tabla 2.2.
Localidades
próximas al río
Ebro en el tramo
de Sobrón-embal-
se del Cortijo

Localidad	Municipio	Provincia	Nº habitantes	Distancia (1) (m)
Barcina del Barco	Valle de Tobalina	Burgos	104	2.350
Baños de Ebro	Baños de Ebro	Álava	335	-
Briñas	Briñas	La Rioja	198	50.519
Briones	Briones	La Rioja	810	66.878
Cenicero	Cenicero	La Rioja	2.098	106.951
Cuezva	Valle de Tobalina	Burgos	20	55.000
Gimileo	Gimileo	La Rioja	93	59.978
Guinicio	Miranda de Ebro	Burgos	27	18.400
Haro	Haro	La Rioja	9.150	49.075
Ircio	Miranda de Ebro	Burgos	42	33.850
La Puebla de la Barca	La Puebla de la Barca	Álava	864	109.951
Miranda de Ebro	Miranda de Ebro	Burgos	32.907	30.569
Montañana	Miranda de Ebro	Burgos	22	21.409
Nave (La)	Miranda de Ebro	Burgos	24	27.609
Pangusion	Valle de Tobalina	Burgos	34	5.000
Puentelarrá	Lantaron	Álava	75	16.000
S. Vicente de la Sonsierra	S. Vicente de la Sonsierra	La Rioja	1.096	70.278
Santa María de Garoña	Valle de Tobalina	Burgos	16	400
Sobron	Lantaron	Álava	42	10.450
Suzana	Miranda de Ebro	Burgos	104	25.059
Tobalinilla	Valle de Tobalina	Burgos	5	4.800

(1) Distancias medidas por el cauce del río desde el avenamiento del canal de descarga de la central nuclear Santa María de Garoña y el punto del cauce que se encuentra a la altura de la localidad.

del puente que conduce a la central nuclear y a la población de Solomera, ambas ubicadas en la misma península. La distancia desde dicho puente al final de la U que envuelve a la central nuclear es de 2.600 m. La población Santa María de Garoña se encuentra situada al sur de la central nuclear a una distancia en línea recta de 600 m, mientras que a 7.500 m del puente de acceso a la central nuclear, se encuentra el puente mediante el que se accede a la población de Tobalinilla, la cual presenta construcciones muy próximas a la orilla del embalse.

Todas las localidades tienen una escasa población, tabla 2.2. Baste saber que en todo el valle de Tobalina, comarca en la que se encuentran enclavadas todas ellas, la población total es de 1.111 habitantes.

Las infraestructuras construidas en el embalse son las siguientes:

- Canal de toma de agua, equipado con rejillas, de la central nuclear Santa María de Garoña.
- Canal del vertido de la central nuclear Santa María de Garoña, que aprovecha un antiguo canal de riego.
- Dos puentes, uno de acceso a la central nuclear Santa María de Garoña y el otro de acceso a la población de Tobalinilla.
- Presa de Sobrón.

La presa del embalse es de tipo gravedad, planta rectilínea, y de longitud de coronación 174 m. Presenta tres vanos de 16,8 m de luz y 5,5 m de altura, en los que se alojan compuertas tipo Taintor, que constituyen el vertedero del embalse, el umbral de las compuertas está situado a la cota 506 m.s.n.m., y presentan una capacidad de vertido $360 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. De las tres compuertas, las extremas son de accionamiento eléctrico manual y la central es automática, activada por el nivel de agua en el embalse. La presa está dotada de un aliviadero de fondo situado a una cota de 482,4 m.s.n.m. y constituido por dos tuberías de sección cuadrada de 1,20 m de lado con una capacidad de desagüe de $24,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

En la margen izquierda del embalse y a unos 20 m aguas arriba de la presa, está la toma de agua de la central hidroeléctrica del mismo nombre, formada por dos vanos de 5,5 m de anchura, separados por una pila de 1 m de espesor y protegidos por sendas rejillas. El umbral de la toma de agua se encuentra a la cota de 498,9 m.s.n.m con un caudal medio mensual, por potencia en las máquinas, de $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

En la margen derecha del embalse, a unos 100 m aguas arriba de la presa, funciona una estación meteorológica dotada de veleta, anemómetro, termómetros de máxima y mínima, pluviómetro, barómetro, hidrómetro y cuba de evaporación, mientras por la margen izquierda discurre paralela la carretera Miranda de Ebro-Traspederne, A-2122.

La generación de energía hidroeléctrica y refrigeración de la central nuclear Santa María de Garoña constituyen los principales usos del agua contenida en el embalse. En la presa de Sobrón se detrae caudal para la central hidroeléctrica de Sobrón (máximo $80 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Esta central nuclear emplea unos $24 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para la refrigeración y requiere una cota estable del embalse (alrededor de 511 m.s.n.m.). Aguas arriba del avenamiento del canal de descarga de la central, y dentro de su zona de influencia, no se han observado tomas de agua en el río Ebro. En la margen izquierda del río y a la altura de la población de Bárcina del Barco, se encuentran en explotación algunos huertos familiares que podrían suministrarse de agua del río para fines de regadío, existiendo una toma fija de agua para riego cerca de Pangusión. No obstante, esta zona se encuentra al final de la zona de influencia de la central nuclear y la concentración de actividad de un vertido debería ser muy pequeña.

El tramo, navegable a remo y a motor, está calificado como de aguas trucheras (Orden de 13 de marzo de 1998, J. C. y L. y Orden Foral 5/1998 de 14 de enero) y de pesca, aunque esta actividad cinegética se encuentra restringida en el tramo comprendido entre el puente de Tobalinilla y la toma de agua de la central nuclear.

Embalse de PuenteIarrá

La cola del embalse de PuenteIarrá llega hasta la salida de turbinas de la central hidroeléctrica de Sobrón. Este embalse actúa como contraembalse de

el de Sobrón y ocupa el cauce del río Ebro. En la parte más alta del embalse, el río describe dos meandros y discurre hacia el este y después hacia el sur. El caudal coincide prácticamente con los aportes de Sobrón que fuera de la época de riego raramente bajan de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en los meses no lluviosos. En la época de riegos, el caudal se encuentra habitualmente entre 20 y $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La salida del embalse tiene lugar a través de las turbinas de la central hidroeléctrica de PuenteIarrá.

La capacidad del embalse, cuya cota de llenado presenta fluctuaciones de hasta 2 m , es de 1 hm^3 , la anchura máxima es de 100 m y la profundidad máxima es de 8 m con una aportación media anual de unos 1.550 hm^3 (sin contar las del Omecillo, que desemboca a 1 km de la presa) lo que significa que la tasa de renovación es muy elevada (casi dos veces al día con caudales mínimos y del orden de 4 veces al día por término medio).

En la margen izquierda del río Ebro, aguas abajo de la presa del Sobrón e inmediatamente tras ésta, se encuentra la localidad de Sobrón con solo 45 habitantes pero con diferentes establecimientos de hostelería y un balneario. La proximidad de dicha localidad a la presa hace que se pueda considerar que en esta superficie la concentración de actividad sea prácticamente igual a la que exista en la zona más próxima a la presa de Sobrón.

En la parte de descarga de las turbinas de la central hidroeléctrica del Sobrón se encuentra ubicado un pequeño asentamiento de muy pocas casas y se ha construido una piscina natural y una zona de pic-nic, denominada "La Playa".

En la zona comprendida entre la presa de Sobrón y la descarga de la central hidroeléctrica del mismo nombre, y a la altura de la población de Sobrón, se encuentra construido un puente de cemento, el de la Cueva Alta, para peatones. La carretera BU-530 recorre la margen izquierda del tramo a lo largo de todo su recorrido.

En el tramo, se encuentran en explotación dos centrales hidroeléctricas. La central hidroeléctrica de Sobrón fue puesta en operación en el año 1899 y está dotada de 2 grupos Francis con una potencia eléctrica instalada de $28,8 \text{ MW}$. El caudal de concesión es de $70 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, con un salto bruto de $3,32 \text{ m}$. El terreno en el que se encuentra construida pertenece al término municipal de Salinas de Añana y es propiedad de Iberdrola. La central hidroeléctrica de PuenteIarrá, por su parte, fue puesta en funcionamiento en 1954 estando dotada de 3 turbinas con una potencia eléctrica de $3,51 \text{ MW}$. El caudal de concesión es de $55 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, con un salto bruto de $7,92 \text{ m}$. El terreno en el que se encuentra construida pertenece al término municipal de Santa Gadea del Cid y es propiedad de Iberdrola. La presa de la central hidroeléctrica es de gravedad, de 19 m de altura y de 130 m de longitud en su coronación. Incluye además un sistema de compuertas capaz de aliviar $1.800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, no dispone de escala para peces.

El principal empleo de todo el tramo es la pesca. Está calificado como aguas trucheras (Orden de 13 de marzo de 1998, J. C. y L. y Orden Foral 5/1998 de 14 de enero). Un segundo uso, es la producción de energía eléctrica en las dos centrales hidroeléctricas instaladas. En la parte alta, la piscina natural se utiliza para baños. Por último, en la zona del embalse, en la margen izquierda existen dos tomas de agua para riego, una fija y otra temporal, figura 2.1.



Figura 2.1.
Zonas de regadío
de la cabecera del
río Ebro

Embalse de Cabriana

A la salida de turbinas de la central hidroeléctrica de Puentelarrá, el agua discurre con velocidad apreciable a lo largo de una corta distancia, del orden de 1.000 m. A distancias mayores el agua se remansa debido a la presencia de la presa de la central hidroeléctrica de Cabriana. De la margen izquierda se desvía el canal que alimenta a dicha central hidroeléctrica. La capacidad de turbinación de esta central hidroeléctrica es de $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, por lo que en régimen de lluvias normal, el caudal que discurre por el cauce del río se limita a las aportaciones de pequeñas fuentes, filtraciones de la presa y surgencias, sumando entre todas unos 20 l s^{-1} .

La zona de río, el área próxima a la presa de Puentelarrá, consiste básicamente en tablas, aunque también hay algún pequeño rápido. El sustrato es de cantos rodados, gravas y arena con una anchura de unos 50 m y una profundidad inferior a 2 m.

El embalse de la central hidroeléctrica de Cabriana se ajusta al cauce del río en todo su desarrollo. La capacidad no está bien documentada y mientras según unas fuentes es de entre 1 y 2 hm^3 , según otras es de $4,7 \text{ hm}^3$. La profundidad máxima es

de 6 m y la tasa de renovación del agua es muy elevada. La cota de agua en el embalse fluctúa muy poco. Los sedimentos en la zona embalsada, que desprenden mal olor y son muy negros, consisten en arenas, limos y combinaciones de éstos, aumentando la fracción arenosa hacia las orillas y la cola del embalse.

El caudal en este tramo es muy similar al del tramo de Puentelarrá, aunque cuenta con algunos arroyos temporales. Cuando el río Ebro lleva menos de $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, que es lo que la central hidroeléctrica de Cabriana puede turbinar, el caudal del río aguas abajo de la presa se limita a aportaciones de pequeñas fuentes (una salina y otra dotada de caño para uso público), filtraciones de la presa y surgencias (entre todas 20 l s^{-1}). Cuando el caudal del Ebro es superior (estación lluviosa y episodios lluviosos aislados) la presa de Cabriana vierte por el aliviadero aportando caudales al cauce que en ocasiones son muy importantes (su capacidad de aportación por aliviadero es de $67 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

Las localidades más próximas al río en este tramo son: Puentelarrá, Suzana, La Nave, Montañana, Guinicio. Todas ellas escasamente pobladas. En la tabla 2.2 se muestra el municipio a que pertenece cada una de ellas y su número de habitantes.

En la localidad de Puentelarrá hay un puente de piedra. La presa de Cabriana, de 6 m de altura, es de gravedad y muy antigua (1922). Carece de aliviadero de superficie, sin embargo posee 9 compuertas de aliviadero, 4 de accionamiento automático y 5 de accionamiento manual, con una capacidad de evacuación de $75 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ cada una; también tiene un aliviadero de medio fondo que normalmente no opera y no tiene escala de peces.

La carretera de Miranda de Ebro a Puentelarra discurre paralela al río por la margen derecha; por la izquierda lo hace la carretera A-2122. En la parte más baja del tramo, entre la presa de Cabriana y la central hidroeléctrica del mismo nombre, y paralelo al cauce del río, discurre el canal que alimenta a la central hidroeléctrica. Se trata de un canal de perfil trapezoidal de 10 m de anchura en su parte superior y una longitud de 1.000 m. Al final del tramo, se encuentra la central hidroeléctrica de Cabriana, de 4,8 MW de potencia instalada que dispone, además, del canal de salida de turbinas, de una compuerta lateral que se abre automáticamente en el caso de disparo de las turbinas para asegurar el caudal ecológico de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ que debe circular por Miranda de Ebro.

El uso del embalse es fundamentalmente hidroeléctrico, existiendo además, en el tramo comprendido entre la presa de Puentelarrá y la de Cabriana, 11 detracciones de caudal con destino agrícola e industrial, tres de ellas permanentes, figura 2.1. Conviene destacar que en el tramo se encuentra instalado el polígono industrial de Lantarón que cuenta con un cierto número de industrias químicas. Por otro lado, en la margen izquierda, y a la altura del pk 7,240 de la carretera A-2122, hay una chopera con área de pic-nic y una piscina natural construída en el río. El tramo,

navegable a remo y motor, está calificado como aguas ciprinícolas (Orden de 13 de marzo de 1998, J. C. y L. y Orden Foral 5/1998 de 14 de enero). Aguas abajo de la presa de Cabriana existen 2 detracciones de caudal para uso agrícola.

Ebro-medio

Tras la central hidroeléctrica de Cabriana, las aguas son corrientes durante 1.000 m, aproximadamente, después se remansan debido a un azud construido en el río a su paso por la ciudad de Miranda de Ebro.

Superado el azud de Miranda, el agua presenta circulación que se ve interrumpida por nueve azudes y presas de pequeño tamaño construidos para usos de generación hidroeléctrica y otros usos: San Felices (Conchas de Haro), Labastida, Molino Viejo (Briñas), San Vicente de la Sonsierra, Cenicero, Buicio, Lapuebla de la Barca (dos azudes) y El Cortijo. La orientación del tramo es sureste hasta el avenamiento del río Najerilla, a partir del cual se orienta al este. Aguas abajo de la salida de turbinas de la central hidroeléctrica de Cabriana, el cauce es débilmente sinuoso, algo encajado al principio y posteriormente va abriéndose a medida que se adentra en la depresión de Miranda de Ebro, aguas abajo de la cual, el cauce se vuelve débilmente sinuoso hasta Las Conchas de Haro donde cruza los montes Obarenses y la Sierra de Toloño (5.000 m de recorrido entre montañas). Posteriormente a este lugar, el río alcanza la depresión central de la cuenca y describe 3 marcados meandros antes de la presa de Labastida. Entre esta presa y la cola del embalse de El Cortijo, el cauce es muy sinuoso, presenta 19 meandros, 5 de los cuales son muy pronunciados, y un cierto número de islas. En todo el tramo, el sustrato está constituido por roca madre, cantos rodados y gravas.

El caudal mínimo que circula por el río a su paso por Miranda de Ebro está fijado administrativamente y es de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. En la época de riego, circulan normalmente de 30 a $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Entre Miranda de Ebro y la presa de Labastida, el río recibe las aportaciones de los ríos Bayas, Zadorra, Inglares y Tirón, y de numerosos arroyos. El caudal es siempre superior a los $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ya que es el mínimo establecido para Miranda de Ebro, más las aportaciones posteriores, las cuales suelen encontrarse casi siempre por encima de los $4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El caudal en la época de riego debe encontrarse entre 40 y $60 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Aguas abajo de la presa de Labastida, el único aporte importante es el río Najerilla, que en su desembocadura entra elevado sobre un canchal a $1,5 \text{ m}$ del nivel del Ebro. Su caudal de estiaje se encuentra aproximadamente entre 1 y $2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Por lo que en este tramo, el caudal, normal y de época de riego, es prácticamente igual que antes de la presa de Labastida. En todo el tramo, los caudales en la época lluviosa son muy superiores.

Las localidades más próximas al río en este tramo son: Miranda de Ebro, Ircio, Briñas, Haro, Gimileo, Briones. San Vicente de la Sonsierra, Baños de Ebro,

Cenicero y Lapuebla de la Barca. En la tabla 2.2. se muestra el municipio a que pertenece cada una de ellas y su número de habitantes.

Este tramo del río Ebro se encuentra más poblado que el resto, siendo el municipio con mayor población Miranda de Ebro con 32.907 habitantes. El resto son localidades y municipios de menor tamaño, que a excepción de Haro, Briónes y Cenicero presentan poblaciones inferiores a los 1.000 habitantes.

Entre la central hidroeléctrica de Cabriana y Miranda de Ebro, el río es atravesado por el puente de la autopista A-1. En el ámbito urbano de Miranda de Ebro existen cinco puentes: el de la nacional I, dos puentes del ferrocarril y dos puentes de uso de vehículos y peatones. En la misma ciudad hay un azud construido en cemento de unos 3 m de altura. Entre Miranda de Ebro y la cola del embalse de El Cortijo, atraviesan el río 9 puentes: el de la autovía A-68, a la salida de Miranda de Ebro, tres puentes, uno viejo y dos nuevos a la altura de Haro, dos puentes a la altura de San Vicente de la Sonsierra y uno a la altura de los siguientes municipios: Baños de Ebro, Cenicero y Lapuebla de la Barca.

Además del azud de Miranda de Ebro existen otros 8 azudes construidos en el río a la altura de las siguientes localidades: San Felices, Briñas, San Vicente de la Sonsierra, Cenicero, Buicio, Lapuebla de la Barca. El azud actual de Briñas sustituye a un antiguo azud de piedra y está construido en piedra en la parte inferior y en la parte superior es neumático. Con una altura total de 3,49 m, la altura de la parte construida en piedra es de 1,9 m. Tiene una longitud de 180 m y la longitud del remanso de agua que genera es de 3.500 m. El azud es aprovechado por una central hidroeléctrica de 1.700 kW de potencia eléctrica instalada.

En San Vicente de la Sonsierra existen dos azudes; el que se encuentra en uso en la actualidad, de gran longitud, está construido en cemento y tiene 3 m de altura, aprovechándose en la actualidad para la generación de energía eléctrica. El segundo azud se encuentra a 16 km de la presa de Labastida y tiene una altura de 1,8 m; en la actualidad, se encuentra en desuso y parcialmente destruido por lo que no presenta una obstrucción total a la circulación del agua.

El azud de Cenicero es pequeño mientras que el azud de Buicio, de 4 m de altura, y que alimenta una central eléctrica de 0,46 MW, está en mal estado y deja bastante caudal circulante. En Lapuebla de la Barca se encuentran construidos dos azudes estando uno de ellos construido antes de que el río pase por la población y otro una vez que se ha rebasado ésta. El primero da servicio a una central hidroeléctrica y el segundo es pequeño. Por último, también se encuentra construida una presa en Labastida, que tiene como misión la producción de energía eléctrica.

La Confederación Hidrográfica del Ebro tiene instaladas estaciones automáticas de aforo, dentro de la red SAHI en Miranda de Ebro (estación A001) y de las redes de alerta (estación 901).

En el tramo comprendido entre la central hidroeléctrica de Cabriana y Miranda de Ebro existen 5 tomas de agua; la primera en Miranda de Ebro (margen izquierda) es importante; el resto se emplea para riego, tres fijas y una temporal. En San Vicente de la Sonsierra existe una toma de agua para abastecimiento. Además en el tramo entre la presa de Labastida y la desembocadura del río Najerilla existen cinco tomas de agua para riego en la margen izquierda y el uso de la central hidroeléctrica de San Vicente de la Sonsierra de 0,25 MW.

En el tramo comprendido entre la desembocadura del río Najerilla y la cola del embalse de El Cortijo, existen dos tomas de agua, una en la margen derecha para riego y otra en la margen izquierda, más importante, a la altura de Lapuebla de la Barca para abastecimiento. En este tramo, navegable a remo y motor, también hay uso para tres centrales hidroeléctricas y hay dos áreas de píc-nic. El tramo está calificado como aguas ciprinícolas (Orden de 13 de marzo de 1998, J. C. y L., Orden Foral 5/1998 de 14 de enero, C. A. P. V., y Orden 5 de 20 de enero de 1998, La Rioja).

1.1.2. Central nuclear de Ascó

La central nuclear de Ascó utiliza como foco frío el río Ebro. Como posible zona de influencia de esta central nuclear se ha considerado el tramo de río Ebro comprendido entre el avenamiento del canal de descarga de la central nuclear y la ciudad de Amposta situada al principio del Delta del Ebro, figura 1.6. El tramo está constituido por un tramo de río con circulación de agua, que solo es afectada por el azud de Cherta, y de canales de servicio que desvían el agua con fines de regadío y suministro de agua a diferentes localidades. El caudal se encuentra regulado por los embalses de Ribaraja y Mequinzenza.

El avenamiento del canal de descarga de la central nuclear se encuentra situado aguas abajo del azud que la central nuclear tiene construido en el río para la toma de agua, fotografía 2.1. El vertido de la central nuclear provoca una corriente muy fuerte que cruza de la margen derecha a la izquierda y continúa por ésta a lo largo de unos 200 m. Aguas abajo del avenamiento del canal de descarga de la central nuclear, el río circula por la pequeña llanura aluvial de Vinebre, con dirección sur-sureste. A continuación, atraviesa el brazo interior de la Sierra Prelitoral Catalana por el Pas de l'Ase. Se trata de una accidentada formación calcárea que acompaña al río hasta antes de la población de García. Después, el Ebro entra en una llanura aluvial que se extiende hasta la población de Miravet. En Miravet se interna en el brazo más robusto de la Sierra Prelitoral Catalana, a través del paso de Benifallet, hasta Cherta. Las riberas en todo este tramo montañoso son abruptas, particularmente la izquierda, dominada por los límites occidentales de la Sierra del Cardó. Las características del Ebro

en este tramo son muy uniformes. El cauce es ancho y profundo, en parte por las operaciones de dragado. En la llanura, los alrededores están cultivados. En la zona de la sierra, el entorno es agreste y presenta pinares bien desarrollados y bosque de ribera. A partir de Cherta, el río corre por una llanura aluvial, estrecha en su inicio, pero que va ensanchándose paulatinamente aguas abajo. La llanura se encuentra limitada por las sierras de Els Ports (por la derecha) y del Boix (por la izquierda), ésta última más próxima al río. Las características morfo-hidrológicas son muy uniformes; el cauce es ancho y profundo y domina el ambiente de tabla. El entorno es muy agreste al principio. En Tortosa y Amposta el tramo es urbano. Entre Tortosa y Camprodró, se manifiesta el intensivo aprovechamiento agrícola de los alrededores.

*Fotografía 2.1.
Río Ebro a su paso
por la central
nuclear de Ascó*



La orientación del río en todo el tramo es sur-sureste, con excepción del tramo comprendido entre Mora de Ebro y Cherta en que la orientación es sur-oeste.

En las proximidades de Mora de Ebro se inicia la vía navegable, la cual posee un canal dragado en el cauce flanqueado por balizas. Las obras de adecuación para la navegabilidad del primer sector, hasta Miravet, finalizaron en junio de 1998. Estas consistieron en el dragado de 80.000 m³ de cauce para crear un canal de 1,5 m de profundidad y 20 m de anchura. El caudal mínimo de navegación que se requiere es de 125 m³ s⁻¹. Desde Tortosa a Amposta, la vía navegable tiene 2 m de profundidad y 50 m de anchura. El caudal mínimo de navegación es de 78 m³ s⁻¹.

Los caudales, hasta la derivación de los canales de Cherta, se encuentran entre 200 y 300 m³ s⁻¹, en años muy lluviosos el caudal medio supera 600 m³ s⁻¹ y en años secos apenas llega a los 200 m³ s⁻¹; el caudal raramente baja de 100 m³ s⁻¹. El caudal aguas abajo del azud de Cherta se ve afectado por las detracciones de los canales de la derecha y de la izquierda del Ebro. Los caudales en ambos canales se mantienen prácticamente constantes a lo largo de todo el año en valores de alrededor de 26 y 17 m³ s⁻¹, para el canal de la derecha y el de la izquierda, respectivamente. Del canal de la derecha del Ebro se detrae un caudal hacia el canal de Tarragona. Este caudal detraído no es constante, pudiendo oscilar bruscamente desde cero hasta valores del orden de 2.400 l s⁻¹.

Las localidades más próximas al río en este tramo son: Ascó, Vinebre, García, Mora la Nova, Mora de Ebro, Benissanet, Ginestar de Ebro, Miravet, Rasquera, Benifallet, Tivenys, Cherta, Aldover, Bitem, Raval de Jesús, Roquetas, Tortosa, Vinallop, Campredó y Amposta. En la tabla 2.3 se muestra el municipio a que pertenece cada una de ellas, su número de habitantes y la distancia al punto de vertido.

Localidad	Municipio	Provincia	Nº habitantes	Distancia (m) ⁽¹⁾
Ascó	Ascó	Tarragona	1.711	0
Vinebre	Vinebre	Tarragona	445	2.000
García	García	Tarragona	533	11.875
Mora de Ebro	Mora de Ebro	Tarragona	2.703	16.520
Mora La Nova	Mora La Nova	Tarragona	4.832	17.100
Benissanet	Benissanet	Tarragona	1.016	24.070
Ginestar	Ginestar	Tarragona	829	24.100
Miravet	Miravet	Tarragona	806	28.309
Rasquera	Rasquera	Tarragona	865	31.700
Benifallet	Benifallet	Tarragona	886	40.347
Tivenys	Tivenys	Tarragona	936	49.147
Xerta	Xerta	Tarragona	1.218	48.510
Aldover	Aldover	Tarragona	795	53.710
Bitem	Tortosa	Tarragona	1.169	56.910
Raval de Jesús	Tortosa	Tarragona	3.577	67.143
Tortosa	Tortosa	Tarragona	29.600	66.343
Vinallop	Tortosa	Tarragona	288	70.743
Campredó	Tortosa	Tarragona	1.110	74.743
Amposta	Amposta	Tarragona	15.951	81.984

Tabla 2.3.
Localidades próximas al río Ebro en el tramo de influencia de la Central nuclear de Ascó.

(1) Distancias medidas por el cauce del río desde el avenamiento del canal de descarga de la central nuclear de Ascó y el punto del cauce que se encuentra a la altura de la localidad.

El municipio más importante es Tortosa, que cuenta con 29.600 habitantes. Además, el río Ebro atraviesa por el centro de su casco urbano. El segun-

do municipio en cuanto a su número de habitantes es Amposta con 15.951 habitantes. En el resto de municipios, el número de habitantes disminuye considerablemente. Hay 8 municipios con una población comprendida entre 5.000 y 1.000 habitantes y el resto posee poblaciones inferiores a los 1.000 habitantes. Cabe destacar que la mayor densidad de población se concentra en la zona del tramo más alejado de la central nuclear, aguas abajo de la localidad de Cherta, situada a 48.510 m de la descarga de la central nuclear, donde la población total es de 52.490 habitantes frente los 16.780 del resto del tramo. Aguas arriba de esta localidad, la densidad de población es pequeña, con localidades de poblaciones inferiores a los 2.000 habitantes, salvo en el caso de Mora la Nova (2.703) y Mora de Ebro (4.832). La máxima población se acumula en las zonas de valles y la baja densidad de población se agudiza en la zona en que el río atraviesa el brazo más exterior de la Sierra Prelitoral Catalana; entre Miravet y Benifallet, que distan entre sí 12.038 m, no existiendo ninguna localidad ribereña.

La Conferencia Hidrográfica del Ebro tiene instaladas estaciones automáticas de aforo, dentro de la red SAHI en cinco puntos del tramo: Ascó, estación A 163; Tortosa, estación A 0027; canal de Tarragona, estación C 125; canal de la Derecha del Ebro, estación C 126 y canal de la Izquierda del Ebro, estación C 128. Además son de interés para el tramo las estaciones instaladas en los embalses de Mequinenza y Ribarroja, estaciones E 003 y E 004, respectivamente.

Pocos metros aguas abajo del canal de descarga de la central nuclear, existe un puente de cemento que enlaza las poblaciones de Ascó y Vinebre. En la localidad de García, existe una zona deportiva y de pic-nic que se encuentra situada al lado de un muelle abandonado de paso de barca.

Entre las localidades de García y Mora de Ebro, existen tres puentes. El primero, del ferrocarril, situado aguas abajo de la desembocadura del río Ciurana. El segundo es el puente de cemento de grandes arcos que enlaza Mora de Ebro con Mora la Nova, que data de principios de siglo. El tercero es un moderno viaducto de un tramo de autovía construido sobre la N-20. El río Ebro constituye el límite de la localidad de Mora de Ebro por el este, llegando las edificaciones a la propia orilla del río, así mismo, hay construido un embarcadero y club náutico. Mora la Nova también cuenta con embarcadero.

Aguas abajo de Mora de Ebro, a 1.000 m de Benissanet, cruza el río un gaseoducto. En esta localidad y en la de Ginestar hay construidos sendos embarcaderos. A poca distancia de Miravet, se encuentra en uso un paso de barca. A la entrada de la localidad de Benifallet, se ha construido un puente sobre la N-20. En la propia localidad de Benifallet existen dos muelles, uno antiguo y otro de nueva construcción, así como, un muelle abandonado de paso de barca.

A unos 3.000 m, aguas arriba, de la localidad de Cherta, se encuentra construido el azud del mismo nombre. La presa o dique está construida en diagonal sobre el río Ebro. Tiene una longitud de 310 m, una anchura de 3,5 m en coronación y 35 m en los cimientos, y una altura de 6 m. Su disposición geométrica en planta permite, mediante sendos canales a izquierda y derecha del Ebro, la derivación por cada margen de los caudales necesarios para el riego. Toda el agua que no se deriva hacia los canales de la derecha y de la izquierda del Ebro es evacuada por un gran rebosadero central. Este rebosadero abarca toda la longitud de la presa. En cada contrafuerte del azud se sitúan las compuertas para abrir o cerrar los periodos de riego. También se utilizan, si por avería o por otras causas, por ejemplo cuando hay una gran avenida, deben dejarse secos los canales que alimenta el azud. Al final se encuentra la central hidroeléctrica de Cherta que cuenta con 4 turbinas de 4.183 KW por unidad y un salto de 4,9 m.

Ya en la ciudad de Tortosa, la primera infraestructura presente es un monumento a los Caídos que emerge del centro del cauce en el centro urbano de Tortosa. Después se suceden tres puentes: el viejo, el del ferrocarril y el nuevo y un moderno viaducto llamado del Tercer Milenio. El río, a su paso por Tortosa, se encuentra encauzado. Posteriormente aparece un oleoducto a 3.000 m aguas arriba de Amposta. En esta última localidad, se suceden el viaducto de la autopista A-7, el puente viejo (colgante entre dos arcos de piedra) y el puente nuevo de la N-340. La localidad cuenta con diferentes embarcaderos. El canal de la derecha del Ebro atraviesa las localidades ribereñas de la margen derecha.

Los principales usos del agua en este tramo son:

- Abastecimiento a las localidades y municipios de Mora la Nova, Mora de Ebro, Benifallet, Tortosa y otras poblaciones a través de los canales de la derecha e izquierda del Ebro.
- Regadío mediante tomas de agua a lo largo de todo el tramo y a través de los canales derecho e izquierdo del Ebro.
- Ganadería mediante tomas de agua en el tramo comprendido entre Mora de Ebro y Benifallet.
- Producción de energía eléctrica en las centrales de Ascó (nuclear) y Cherta (hidroeléctrica).
- Pesca, aunque no se encuentra catalogado todo el tramo.
- Navegación deportiva y turística.

1.2. Cuenca del río Tajo

En la cuenca del río Tajo, figura 1.7, se encuentran instaladas tres centrales nucleares: Trillo, José Cabrera y Almaraz.

1.2.1. Central nuclear de Trillo

La aspiración de agua de la central nuclear de Trillo se encuentra emplazada en el embalse de La Ermita, situado en el término municipal de Trillo (Guadalajara). Este embalse, de utilización exclusivamente industrial, tiene un volumen total de 2,85 hm³ y aliviadero del tipo de lámina libre, por lo que no produce interrupción en el flujo del río. Las tuberías de descarga de la central terminan en un difusor que desagua prácticamente a pie de presa, punto que se ha utilizado como origen del sistema hidrológico, fotografía 2.2.

Fotografía 2.2.
Embalse de la Ermita y sistemas de toma y vertido de agua de la central nuclear de Trillo.



La zona de influencia de la central nuclear de Trillo se extiende desde la presa del embalse de la Ermita hasta la presa del embalse de Bolarque.

Para la descripción de este tramo de río se consideran tres tramos:

- Tajo alto.
- Embalse de Entrepeñas.
- Embalse de Bolarque.

Tajo alto

El tramo del río Tajo comprendido entre la presa del embalse de La Ermita y la cola del embalse de Entrepeñas discurre por un paraje de orografía accidentada, especialmente por la margen derecha, flanqueada por paredes verticales que impiden el acceso hasta la orilla. La margen izquierda presenta perfiles más suaves y una pista forestal que corre paralela al curso de agua.

La longitud de este recorrido, de meandros muy marcados, es variable y función de la cota de llenado del embalse, que durante el periodo en que se llevaron

a cabo los experimentos de trazador varió entre 709,76 y 713,87 m.s.n.m. Estas alturas de la lámina de agua se corresponden con longitudes del tramo de río comprendidas entre 4.062 y 4.788 m.

El cauce sumergido presentó en los experimentos realizados una anchura comprendida entre 20 y 30 m y un área transversal de flujo variable según el caudal circulante. La pendiente del fondo del canal en este tramo es de $8,7 \times 10^{-4}$ m m⁻¹.

Salvo la localidad de Trillo que se encuentra aguas arriba de la presa de La Ermita, no existen asentamientos de población en la zona.

La única infraestructura construida en este tramo es la presa del embalse de La Ermita y las instalaciones de toma y vertido de agua de la central nuclear.

La Confederación Hidrográfica del Tajo tiene instalada una estación automática de la red SAICA estación nº 7.

Embalse de Entrepeñas

El embalse de Entrepeñas, terminado en 1956, se encuentra situado aguas abajo de la estructura de toma de agua de la central nuclear de Trillo. Recoge las aportaciones de una superficie de la cuenca del río Tajo de 3.929 km², con un caudal medio anual de 24,86 m³ s⁻¹ y una avenida máxima previsible de 1.200 m³ s⁻¹. El volumen total de embalse es de 890 hm³ y su capacidad útil de 828 hm³, que considerando el aporte anual antes indicado proporciona un tiempo medio de residencia de 414,36 días. Las cotas máxima y mínima de embalse se encuentran situadas, respectivamente, a 720,50 y 675 m.s.n.m. El embalse lleno cubre una superficie de 3.400 ha.

La masa de agua contenida en el embalse de Entrepeñas forma un lago artificial de gran capacidad y morfología superficial diversa, que presenta tres zonas claramente diferenciadas:

- La zona alta, encajonada por las abruptas pendientes que rodean el cauce, contiene la cola del embalse y recibe el aporte fundamental, el caudal proveniente del río Tajo. La posición de la cola del embalse depende del estado de llenado y de la altura de la lámina de agua del río. Durante el periodo de desarrollo del proyecto Tracer, la cola se ha localizado a unos 5 km aguas abajo de la presa del embalse de La Ermita.
- La zona media del embalse, en la que el cuerpo se ensancha, presenta alternancia de zonas en que el embalse inunda las llanuras adyacentes y otras en que queda confinado en el antiguo cauce del río. Esta zona contiene un considerable número de aportes secundarios que, sin embargo, tienen escasa importancia para el flujo total circulante.
- El cuerpo principal del embalse presenta una longitud superior a los 9 km y una anchura variable entre 1,5 y 2 km. En esta zona, la profundidad alcan-

za las mayores cotas, lo que unido a su considerable desarrollo superficial, hace que contenga la mayor parte del agua embalsada.

En las inmediaciones de la parte alta del embalse no existen asentamientos de población. No ocurre lo mismo en las inmediaciones de las zonas media y cuerpo principal del embalse en las que en sus márgenes se encuentran diferentes poblaciones y urbanizaciones. En la tabla 2.4 se muestra el municipio a que pertenece cada una de ellas, su número de habitantes y la distancia al punto de vertido.

Las infraestructuras construidas en el embalse son: Un puente, la propia presa del embalse, un canal que comunica este embalse con el de Buendía y varios embarcaderos.

En la parte media del embalse se encuentra construido el puente de la carretera comarcal 204. Dicha carretera recorre la margen derecha del embalse aguas arriba del puente. Aguas abajo del puente la carretera rodea al embalse por su margen izquierda.

La presa del embalse se encuentra emplazada en el término municipal de Auñón y es del tipo de gravedad y planta recta. La coronación tiene una longitud de 383 m y una altura máxima sobre los cimientos de 84 m. El aliviadero está dispuesto en la zona central de la presa, consta de cinco vanos de 10,80 m de longitud, cerrados por compuertas de vagón de 5,50 m de altura. La capacidad conjunta máxima de desagüe es de $1.500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en máximo nivel del embalse.

La base de la toma de agua, situada en el lado derecho de la presa, se encuentra 57,30 m por debajo de la carretera que pasa por la coronación. La conducción de presión se inicia en la toma de agua y consta de dos tuberías forzadas de 62,84 m de longitud y 3 m de diámetro, que alimentan a los dos grupos existentes con un caudal individual de $30,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El salto bruto máximo es de 78 m y el mínimo de 33 m. La potencia instalada es de 36,86 MW y la energía producible en un año medio de 55 GWh.

La margen izquierda del embalse de Entrepeñas, cerca de la localidad de Sacedón, presenta un canal cuyo objetivo es permitir el transvase de los excedentes de agua de la cuenca del río Tajo al vaso del embalse de Buendía, de mayor capacidad, que cuenta con una menor aportación hidráulica. El canal tiene una longitud de 4.655 m y consta de tres tramos, de los cuales el primero, de 597 m, y el último, de 544 m, van a cielo abierto, y el intermedio, de 3.514 m, en túnel. La pendiente del canal es de $0,001031 \text{ m m}^{-1}$ y permite un flujo máximo de agua de $130 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Los embarcaderos se encuentran construidos en las parte media y el cuerpo principal del embalse y son privados o se construyen en el dominio de urbanizaciones.

El embalse de Entrepeñas, a parte de su uso en la generación de energía eléctrica y regadío, es ampliamente utilizado en actividades deportivas y lúdicas.

Embalse de Bolarque

El embalse de Bolarque, terminado en 1954, se encuentra situado aguas abajo de los embalses de Entrepeñas y Buendía. Recoge las aportaciones de una superficie de 7.430 km² de la cuenca del río Tajo, a través del embalse de Entrepeñas, y de 3.256 km² de la cuenca del río Guadiela, vía el embalse de Buendía, que suponen un caudal conjunto medio anual de 45,15 m³s⁻¹, con una avenida máxima previsible calculada en de 2.000 m³ s⁻¹. El embalse presenta un volumen total de 30,70 hm³ y una capacidad útil de 22,81 hm³, que considerando el aporte anual antes indicado proporciona un tiempo medio de residencia de 8,03 días. La cota máxima de embalse está situada a 642 m.s.n.m. y la cota mínima a 636,15 m.s.n.m. El embalse lleno cubre una superficie de 480 ha y es aprovechado tanto para el riego como para la producción de energía hidroeléctrica y navegación deportiva.

La presa del embalse, situada en el término municipal de Pastrana, es del tipo de gravedad y planta curva. La coronación tiene una longitud de 292 m y una altura máxima sobre los cimientos de 43 m. El aliviadero está dispuesto en la zona central de la presa, consta de cuatro vanos de 15 m de longitud, cerrados por compuertas de vagón de 5,50 m de altura, que tienen una capacidad conjunta máxima de desagüe de 1.800 m³s⁻¹ en máxima capacidad del embalse.

El agua del embalse de Bolarque es utilizada en su operación por dos centrales hidroeléctricas situadas a pie de presa. La central hidroeléctrica Bolarque I, cuya toma de agua se localiza en el lado derecho de la presa, es la encargada de suministrar agua al curso del río Tajo. La conducción de presión se inicia en la toma de agua y consta de dos tuberías forzadas de 52,20 m de longitud y 3,65 m de diámetro, que alimentan a los dos grupos existentes un caudal individual de 42,5 m³ s⁻¹. El salto bruto máximo es de 42 m y el mínimo de 36,15 m. La potencia instalada en la central hidroeléctrica de Bolarque I es de 28 MW y la energía producible en un año medio de 67 GWh.

La central hidroeléctrica reversible de Bolarque II, situada en el término municipal de Almonacid de Zorita, se integra en un complejo de aprovechamiento hidráulico que está formado, además, por el embalse de La Bujeda, hasta el que se eleva el agua en horas valle de la demanda eléctrica. La central de bombeo del embalse de La Bujeda es la encargada de suministrar agua al canal del transvase Tajo-Segura. En horas punta, la central Bolarque II se utiliza para la producción de energía eléctrica.

La conducción de presión de la central hidroeléctrica Bolarque II se inicia en la toma de agua situada en la zona izquierda de la presa, con cuatro tuberías de 75 m de longitud y 3,50 m de diámetro, cada una de las cuales conduce a uno de los cuatro grupos existentes. Por su parte, en el embalse de La Bujeda se inicia una galería de presión que tiene una longitud aproximada de 14 km y una sección de 5,35 m de diámetro. Esta conducción termina en una chimenea de equilibrio

que consta de una torre cilíndrica de 25 m de diámetro interior y 60 m de altura y un tramo de pozo de 20 m de profundidad. La chimenea de presión está conectada, mediante una galería blindada, con la caseta de válvulas, de la que arrancan dos tuberías forzadas que tienen una longitud aproximada de 1 km y un diámetro variable entre 3,15 y 3,45 m. Cada una de estas tuberías se bifurca en dos ramales para alimentar los cuatro grupos existentes con un caudal máximo individual de $24,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La conducción de presión se transforma en impulsión cuando se eleva el agua hasta el embalse de La Bujeda.

La central hidroeléctrica de Bolarque II cuenta con una potencia máxima de bombeo de 205,6 MW, correspondiente a un caudal de $49,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, y es capaz de producir 88,8 GWh en un año medio.

El cuerpo del embalse de Bolarque, con una longitud total superior a los 29 km, presenta una morfología esencialmente lineal, excepto en las proximidades del desagüe del embalse de Entrepeñas, donde inunda una pequeña llanura, en la que su anchura crece considerablemente, desde los valores normales 60 – 160 m hasta los 400 m. Aguas abajo de este punto el cauce del río está flanqueado por paredes verticales que definen la anchura del embalse.

Las infraestructuras construidas en el embalse son la propia presa del embalse, un embarcadero y los restos de la infraestructura de una antigua piscifactoría.

Tabla 2.4.
Localidades próximas al tramo de influencia de la central nuclear de Trillo.

Localidad	Municipio	Provincia	Nº habitantes	Distancia (1) (m)
Alique	Alique	Guadalajara	37	27.700
Alocén	Alocén	Guadalajara	156	34.000
Auñón	Auñón	Guadalajara	266	42.400
Budia	Budia	Guadalajara	296	28.100
Casas de Anguix		Guadalajara		56.100
Casasana	Pareja	Guadalajara	47	38.300
Cereceda	Pareja	Guadalajara		24.800
Córcoles	Sacedón	Guadalajara	178	43.700
Chillarón del rey	Chillarón del rey	Guadalajara	137	28.100
Durón	Durón	Guadalajara	110	27.400
El Olivar	El Olivar	Guadalajara	114	29.400
Mantiel	Mantiel	Guadalajara	100	25.200
Pareja	Pareja	Guadalajara	481	36.800
Sacedón	Sacedón	Guadalajara	1.585	44.700
Tabladillo	Pareja	Guadalajara	5	38.300
Valdelagua	Budia	Guadalajara	15	19.700

(1) Distancias medidas por el cauce del río desde la descarga de la central nuclear de Trillo.

No existen poblaciones próximas a las márgenes del embalse. En la zona de influencia del embalse de Buendía existe una urbanización.

1.2.2. Central nuclear José Cabrera

La central nuclear José Cabrera utiliza como foco frío el embalse de Zorita Hidráulica. Este embalse es de pequeña capacidad por lo que se considera como zona de influencia de la central nuclear el propio embalse de Zorita Hidráulica y los dos embalses situados aguas abajo de éste: embalse de Almoguera y embalse de Estremera.

Embalse de Zorita Hidráulica

El embalse de Zorita Hidráulica, terminado en 1947, se encuentra situado aguas abajo del embalse de Bolarque, figura 1.7, y recoge las aportaciones de una superficie de la cuenca del río Tajo de 7.530 km², con un caudal medio anual de 44,26 m³ s⁻¹ y una avenida máxima previsible de 1.800 m³ s⁻¹. El embalse lleno cubre una superficie de 57 ha y almacena un volumen total de agua de 2,60 hm³, con una capacidad útil de 1,47 hm³, que considerando el aporte anual antes indicado proporciona un tiempo medio de residencia de 0,68 días. La cota máxima de embalse está situada a 600 m.s.n.m. y la cota mínima a 598 m.s.n.m. El embalse presenta un doble aprovechamiento industrial, la producción de energía hidroeléctrica y actuar como foco frío de la central nuclear José Cabrera, lo que obliga a mantener el embalse prácticamente lleno en operación normal.

La presa del embalse está situada en el término municipal de Zorita de los Canes y es del tipo de gravedad y planta recta. La coronación tiene una longitud de 65 m y una altura máxima sobre los cimientos de 18,70 m. El aliviadero está dispuesto en la zona central de la presa, consta de cuatro vanos cerrados por compuertas de vagón, tres de ellas de 15 m de longitud y 5,50 m de altura y otra de 5 m de longitud y 8 m de altura, con una capacidad conjunta máxima de desagüe de 1.800 m³ s⁻¹ para el máximo nivel de embalse.

La base de la toma de agua, situada en la margen izquierda del embalse, se encuentra 8 m por debajo de la coronación. La conducción de presión se inicia en la galería que parte de la toma de agua, tiene una longitud de 800 m y 5,50 m de diámetro y termina en la chimenea de equilibrio. De la chimenea de equilibrio salen tres tuberías forzadas de 75 m de longitud y un diámetro de 3,80 m que alimentan, a cada uno de los tres grupos existentes, un caudal máximo individual de 31,5 m³ s⁻¹. El salto bruto máximo es de 15 m y el mínimo de 13 m. La potencia instalada en la central hidroeléctrica de Zorita es de 10,56 MW y la energía producible en un año medio de 19 GWh.

La central nuclear José Cabrera extrae de forma continuada un caudal de 6,67 m³ s⁻¹ para realizar funciones de refrigeración. La aspiración se realiza por medio de dos tuberías de 1,37 m de diámetro, cuyo centro se encuentra a 3 m de profundidad. Una vez utilizada, el agua es devuelta al embalse por medio de un canal superficial, que vierte aguas abajo de la aspiración.

El embalse es atravesado por el puente de la carretera comarcal 200. La población más próxima al embalse es Zorita de los Canes, tabla 2.5, así mismo y muy próxima a la margen izquierda del embalse se encuentra el poblado de residencia de los trabajadores de la central nuclear José Cabrera. Otras poblaciones próximas se recogen en la tabla 2.4. En la margen derecha del embalse se encuentran construidas pequeñas casas de campo, algunas de ellas cuentan con pequeños huertos familiares.

Tabla 2.5.
Localidades próximas al tramo de influencia de la central nuclear José Cabrera.

Localidad	Municipio	Provincia	Nº habitantes	Distancia (1) (m)
Albalate de Zorita	Albalate de Zorita	Guadalajara	1.010	17.400
Almoguera	Almoguera	Guadalajara	862	24.900
Almonacid de Zorita	Almonacid de Zorita	Guadalajara	1032	12.000
Brea de Tajo	Brea de Tajo	Madrid	443	36.500
Driebes	Driebes	Guadalajara	364	34.000
Estremera	Estremera	Madrid	1.074	47.000
Leganiel	Leganiel	Cuenca	244	42.600
Mazuecos	Mazuecos	Guadalajara	395	29.200
Sayaton	Sayaton	Guadalajara	136	300
Yebra	Yebra	Guadalajara	519	8.500
Zorita de los Canes	Zorita de los Canes	Guadalajara	88	11.900

(1) Distancias medidas por el cauce del río desde el avenamiento del canal de descarga de la central nuclear José Cabrera hasta el punto del cauce que se encuentra a la altura de la localidad.

Embalse de Almoguera

El embalse de Almoguera, terminado en 1947, se encuentra situado aguas abajo del embalse de Zorita Hidráulica y recoge los aportes de una superficie de la cuenca del río Tajo de 7.880 km², con un caudal medio anual de 44,26 m³s⁻¹ y una avenida máxima previsible de 2.000 m³ s⁻¹. El volumen total del embalse es de 6,50 hm³ y su capacidad útil de 2,90 hm³, que considerando el aporte anual antes indicado proporciona un tiempo medio de residencia de 1,70 días. La cota máxima de embalse está situada a 585 m.s.n.m. y la cota mínima a 583 m.s.n.m. El embalse lleno cubre una superficie de 186 ha y es aprovechado para la producción de energía hidroeléctrica.

La presa del embalse está situada en el término municipal de Almoguera y es del tipo de gravedad y planta recta. La coronación tiene una longitud de 65 m y una altura máxima sobre los cimientos de 20,50 m. El aliviadero está dispuesto en la zona central de la presa y consta de cuatro vanos cerrados por compuertas de vagón, tres de ellas de 15 m de longitud y 5,5 m de altura y otra de 5 m de longitud y 8 m de altura, con una capacidad conjunta máxima de desagüe de 1.600 m³s⁻¹ con máximo nivel de embalse.

El abastecimiento de las mancomunidades de Almoguera-Mondejar, El Girasol y Algodor se realiza desde la estación de bombeo instalada en las proximidades de la presa de Almoguera. La mancomunidad de Almoguera-Mondejar abastece a 33 localidades de las provincias de Guadalajara y Madrid. Las mancomunidades de El Girasol y Algodor suministran a 9 municipios de las provincias de Cuenca y Toledo (El Acebrón, Almendros, Belinchón, Fuente de Pedro Naharro, Tarrancón, Villarubio, Zarza de Tajo y Sta. Cruz de la Zarza), se pretende ampliar el suministro a los siguientes municipios: Tribaldos, Pozorrubio de Santiago, Valderíos y Leganiel.

Ambas márgenes del embalse se encuentran cultivadas y se observan diferentes tomas de agua para regadío.

Embalse de Estremera

Agua abajo del embalse de Almoguera, el agua que circula por el río Tajo lo hace a través de un canal de abastecimiento de la central hidroeléctrica del mismo nombre, un tramo de río con circulación de agua y del embalse de Estremera. El cauce del río entre la presa de Almoguera y la salida de turbinas se encuentra cubierto por una pequeña lámina de agua sin apenas circulación. Por lo tanto en el tramo comprendido entre las presas de Almoguera y Estremera se pueden considerar tres tramos.

- Canal de servicio de la central hidroeléctrica de Almoguera.
- Tramo de río.
- Embalse de Estremera.

El canal es un canal abierto de 955 m de longitud. Costa de tres secciones. La primera, de 135,48 m, presenta sección transversal en forma rectangular de 9 m de anchura y una cota de fondo de 580,75 m.n.s.m. La segunda sección tiene una longitud de 601,93 m y presenta una sección transversal de forma trapezoidal de 15 m de anchura en la coronación del canal y 5 m de anchura en su fondo, en esta sección la cota de fondo es 580,71 m.n.s.m. La tercera sección, la situada más próxima a la central hidroeléctrica, presenta una longitud de 217,89 m, su sección transversal es rectangular, 9 m de ancho, y su cota de fondo es 580,58 m.n.s.m. La cota de coronación del canal es 585 m.n.s.m. en toda su longitud.

A la salida de turbinas de la central hidroeléctrica de Almoguera el agua discurre por un tramo de río en el que hay circulación de agua. La longitud de este tramo de río es de 5.145 m. La circulación de agua en el río se ve interrumpida por un pequeño azud construido para dar servicio a una piscifactoría. Una vez superado el azud, el agua queda remansada por efecto de la presa de Estremera.

La presa de Estremera es propiedad del Estado y fue construida con fines de regadío. La longitud de río embalsado es de 12.600 m. En la parte más

ancha del embalse, la anchura del cauce sumergido es de 50 m. Aguas abajo, la anchura aumenta hasta 100 m. La pendiente del cauce del embalse es de $0,00123 \text{ m m}^{-1}$. Durante la época de regadío, se permite que el agua rebose por encima del azud y presenta el máximo nivel. En época de no regadío, el agua se descarga por una compuerta lateral de la presa y el nivel de agua es 1,5 m menor que el nivel máximo del embalse. En ambos periodos de tiempo, el nivel de agua en el embalse no presenta oscilaciones. El principal aporte de agua proviene del río Tajo a través de la descarga de turbinas de la central hidroeléctrica de Almoguera. Existen otros aportes por ambas márgenes, pero están constituidos por pequeños arroyos que solamente presentan aportaciones importantes en épocas de grandes lluvias. Otras características del embalse se pueden ver en la tabla 2.1.

Aguas arriba de la descarga de la central hidroeléctrica de Almoguera, en la margen derecha, se separa un canal de regadío que avena en el embalse a la altura de la desembocadura del arroyo de la Parada. A pocos metros de dicho avenamiento, se derivan dos canales que tras unirse avenan en el embalse a 700 m aguas arriba de la presa de Estremera. Ambos canales sirven para regadío de los cultivos implantados en una zona próxima a la margen derecha del embalse. Así mismo, en esta margen y durante la realización de las medidas experimentales se observaron diferentes estructuras que podían ser enclaves de toma de agua temporales. En la margen izquierda existen dos tomas de agua permanentes, una para regadío y otra es una toma de agua subterránea para abastecimiento de la localidad de Leganiel y a una instalación ganadera instalada en las proximidades del embalse. La toma de agua más importante es el canal de Estremera, que nace en la propia presa del embalse. Este canal riega con un caudal de $2,3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ una superficie de 3.000 ha de términos municipales de las provincias de Guadalajara y Toledo.

Los terrenos situados en ambas márgenes del embalse se encuentran cultivados. No existen localidades próximas al embalse, pero si se han construido diferentes casas de campo y de recreo en las propias riberas.

Salvo en régimen de avenida, en que los caudales pueden alcanzar los $1.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, el régimen de caudales de entrada y salida al embalse son muy regulares. En época de regadío, el caudal se encuentra entorno a $25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. En época de no regadío el caudal se encuentra en valores alrededor de $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

La Confederación Hidrográfica del Tajo tiene instalada una estación de aforo en el tramo comprendido entre la central hidroeléctrica de Almoguera y el azud de la piscifactoría, AR08, y una estación del SAICA en el canal de Estremera, AC03.

Por la margen izquierda discurre una carretera regional que une las localidades de Almoguera y Leganiel.

1.2.3. Central nuclear de Almaraz

El sistema de refrigeración del condensador de la central nuclear de Almaraz es de lazo abierto al embalse de Arrocampo. El embalse de Arrocampo toma y vierte agua al embalse de Torrejón-Tajo, fotografía 2.3. Por ello se ha considerado que el tramo de influencia de la central nuclear de Almaraz está constituido por ambos embalses: Arrocampo y Torrejón-Tajo. Ambos embalses pertenecen a la cuenca media del río Tajo.

Embalse de Arrocampo

El embalse de Arrocampo entra en servicio en el año 1983, es el foco frío de la central nuclear de Almaraz, está construido expresamente para tal fin y es propiedad de la misma central nuclear. El embalse inunda el antiguo cauce del arroyo de Arrocampo y presenta una geometría dendrítica, con entrantes ramificados. La parte más estrecha del embalse corresponde a la zona próxima a la presa de Arrocampo con una anchura media de 500 m. La mayor anchura del embalse es la correspondiente al frente de la central nuclear de Almaraz y presenta una anchura media 1.350 m con una anchura máxima de 2.500 m. En la proximidad de la población de Saucedilla, en la cola del embalse, la anchura es de 250 m. Otras características del embalse se pueden ver en la tabla 2.1.

La masa de agua del embalse se encuentra separada en dos partes por una pantalla separadora cerrada en todo su perímetro, excepto en la zona más próxima a la presa donde se puede permitir la circulación de agua entre ambas partes del embalse. Por tanto, desde el punto de vista del proyecto, se puede considerar que el embalse de Arrocampo se encuentra dividido en dos subembalses, que de ahora en adelante denominaremos embalse caliente y embalse frío.

La central toma agua del embalse frío para su circuito de refrigeración con unos requerimientos máximos de caudal de $92,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y descarga en el embalse caliente, fotografía 2.3. La temperatura del agua de salida del canal de descarga de la central nuclear es superior a $27 \text{ }^\circ\text{C}$, en las campañas de medida realizadas en el embalse, las temperaturas en el canal de descarga de la central nuclear estuvieron comprendidas entre $31,4 \text{ }^\circ\text{C}$ y $39,4 \text{ }^\circ\text{C}$. El agua caliente circula por el embalse caliente refrigerándose por convección natural y evaporación. Si la temperatura del agua, cuando ha recorrido todo el embalse, es inferior a $27 \text{ }^\circ\text{C}$, la totalidad del agua es recirculada al embalse frío. Si la refrigeración del agua en el embalse caliente no ha sido la deseada y la temperatura de ésta excede los $27 \text{ }^\circ\text{C}$ solamente se recircula parte del agua al embalse frío. El resto se vierte al embalse de Torrejón-Tajo y se bombea agua fresca desde el mismo embalse hacia el embalse frío. El nivel de agua en el embalse se mantiene constante y como solamente exis-

Fotografía 2.3. Embalse de Arrocampo y su descarga al embalse de Torrejón-Tajo.

ten pérdidas por evaporación, los caudales vertidos y bombeados a y desde el embalse de Torrejón-Tajo son prácticamente iguales. En verano la temperatura media del agua bombeada es 24 °C y la de retorno 30 °C.

En sus márgenes existen avenamientos de arroyos de escasa importancia (Arrocampo, Sta. Rosa, Galapagoso, Pueblo, Viñas, Castillo, Zahurdón, Carnaceos, Juncos, Rejones, Quebrada del Rosal, Corchos, Niñas, Francés y Molinillo) por lo que el aporte principal corresponde al embalse de Torrejón-Tajo, a través de una central de bombeo, situada a 680 m aguas arriba de la descarga de la presa de Arrocampo.



En la margen derecha del embalse frío, hay pequeñas lagunas que, aparentemente, no tienen comunicación superficial con el embalse.

Las longitudes de los embalses frío y caliente son 4.708 m y 14.700 m, respectivamente. Las pendientes de la línea de energía son 0,00328 y 0,00276 m m⁻¹ para el embalse frío y el caliente, respectivamente.

En las proximidades del embalse solamente se encuentran ubicadas las localidades de Saucedilla y Almaraz, pertenecientes ambas a la provincia de Cáceres. La primera, con 617 habitantes, se encuentra a orillas de la cola del embalse caliente a una distancia del punto de descarga de la central nuclear, medida en línea recta, de 5.300 m Almaraz, por su parte, cuenta con 1.439 habitantes y se sitúa en la margen derecha del embalse y separado unos 1.000 m de éste.

La Confederación Hidrográfica del Tajo tiene instaladas dos estaciones de control de la calidad del agua, estaciones AC15 y I11.

La presa del embalse es de gravedad y planta recta con una longitud de coronación de 218 m y cota de 258 m.s.n.m. El aliviadero principal es de labio fijo a cota de 255 m.s.n.m. y con capacidad de 21,4 m³ s⁻¹. El desagüe de fondo esta constituido por dos tuberías de 1 m de diámetro, con capacidad de 11,7 m³ s⁻¹ y su eje esta situado en la cota de 237 m.s.n.m. En el lateral de la margen derecha se encuentra el bocal del canal que descarga agua al embalse de Torre-

jón-Tajo. Como el nivel del embalse debe ser constante, el bocal del canal es de rebosadero.

La necesidad de bombeo de agua desde el embalse de Torrejón- Tajo en época estival requiere de un circuito hidráulico. El circuito hidráulico esta constituido por una central de bombeo en el embalse Torrejón- Tajo y una conducción. Para conseguir condiciones óptimas de refrigeración, la central de bombeo esta situada sobre el embalse de Torrejón- Tajo, a 680 m aguas arriba de la confluencia de la descarga del embalse de Arrocampo. La conducción, con una capacidad de $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, tiene una longitud de más de 700 m y un diámetro de 4,5 m. Lleva chimenea de equilibrio de 25 m de diámetro interior, situada a 57 m del eje de las bombas.

En el embalse se encuentran construidos diferentes tabiques separadores, fotografía 2.3. Uno es completamente cerrado, salvo en su parte más próxima a la presa, donde se encuentra abierto por debajo del nivel del agua del embalse. El resto son tabiques abiertos que tienen por objeto aumentar el recorrido del agua por el embalse. Uno de ellos recorre el embalse a lo largo de su eje longitudinal, en dirección sur- oeste. Otros tres tabiques de menor tamaño se derivan del anterior, dos de ellos en dirección norte y el restante en dirección oeste, fotografía 2.3,

En la margen del embalse se sitúa la central nuclear de Almaraz con las estructuras correspondientes a su toma de agua, canal de descarga y el embalse de emergencias.

Muy próximo a la presa, en la zona de mayor profundidad del embalse, se ha montado una estación de bombeo para recircular el agua que se acumula, en esta zona, en el fondo del mismo. A unos 2.000 m de la descarga de la central nuclear, en el centro de la sección del embalse, se encuentra implantada una columna de la red eléctrica. La zona de la margen derecha, próxima a la presa, se encuentra recorrida por una pista que da acceso a diferentes puestos de pesca.

No existen detracciones de agua en el embalse de Arrocampo y su uso es exclusivo para refrigeración de la central nuclear. Si bien está permitido pescar en el embalse. La presencia de pastos ganaderos y cotos de caza en el entorno del embalse hace que el agua del embalse pueda ser utilizada para abrevar ganado y animales en estado salvaje.

Embalse de Torrejón-Tajo

El embalse de Torrejón- Tajo se encuentra situado entre el embalse de Valdecañas y el embalse de Alcántara y se halla comunicado con el embalse de Arrocampo utilizado como foco frío por la central nuclear de Almaraz. Otras características del embalse se pueden ver en la tabla 2.1

Se encuentra limitado por la margen derecha por la Sierra de Serejón y por la margen izquierda por las Sierras de Deleitosa y de la Peña. El embalse recoge las apor-

taciones de una superficie de la cuenca del río Tajo de 37.073 km², con un aporte medio anual de 117,58 m³ s⁻¹. La capacidad máxima de embalse es de 166 hm³, con cota de embalse en 242,5 m.s.n.m. Su capacidad normal es de 142 hm³, con lámina de agua situada en la cota 240 m.s.n.m. El embalse lleno cubre una superficie de 1.041 ha.

La presa del embalse está situada en el término municipal de Serrejón, provincia de Cáceres, próxima a la confluencia de los ríos Tajo y Tiétar. Su proximidad al embalse de Torrejón-Tietar y a la cola del embalse de Alcántara permite la interconexión de los tres embalses, a través de la central hidroeléctrica de Torrejón-Tajo lo que habilita diferentes modos de explotación en los que se combinan la turbinación y el bombeo desde / hacia los embalses, para aprovechar las variaciones de las tarifas eléctricas entre las horas nocturnas y las de máxima demanda. Estos modos de explotación incluyen las siguientes posibilidades:

- Bombeo del embalse Torrejón-Tiétar al embalse Torrejón-Tajo.
- Turbinación del embalse Torrejón-Tajo al río Tajo (Embalse de Alcántara).
- Bombeo desde el río Tajo (Embalse de Alcántara) al embalse Torrejón-Tajo.
- Turbinación del embalse Torrejón-Tiétar al río Tajo (Embalse de Alcántara).
- Bombeo desde el río Tajo (Embalse de Alcántara) al embalse Torrejón-Tiétar.

Sus principales aportes son los originados por el embalse de Valdecañas, cuya presa se encuentra en la cola del embalse de Torrejón-Tajo, el embalse Torrejón-Tiétar, que avana en la propia presa de Torrejón-Tajo y aporta agua de muy diferentes características a la aportada por el río Tajo y, debido a la naturaleza del aporte y no a su cuantía, la descarga del embalse de Arrocampo situada a 29.300 m de la presa del embalse Torrejón-Tajo. Otros aportes por la margen derecha son los arroyos de Paradero, Malparaiso, Madroña, Requemade, Garganta y Huertas. Por la margen izquierda, el embalse presenta los siguientes avenamientos de arroyos: Canal, Arrogato, Corrinches, Garganta, Giraldillo, Arropuerto, Colmenilla, Río-nío, Tueña y Aguijón.

Las principales tomas de agua son las de la estación de bombeo del embalse de Arrocampo, a una distancia de la presa del embalse de 29.980 m con una capacidad de 50 m³ s⁻¹, una central de bombeo, con fines de regadío, situada 700 m aguas arriba de la central de bombeo del embalse de Arrocampo y el trasvase al embalse de Torrejón-Tiétar a través de un canal de superficie situado en la propia presa del embalse y que a la vez es utilizado para la alimentación de turbinas de la central hidroeléctrica instalada a pie de presa.

Los caudales de cada una de las entradas y salidas son muy variables. El bombeo desde el embalse de Torrejón-Tietar es intermitente. El caudal de este aporte oscila entre 0 y 89 m³ s⁻¹. El caudal medio de bombeo es de 12,27 m³ s⁻¹. El aporte de la central hidroeléctrica de Valdecañas es el más importante, su cau-

dal medio es de $54,53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. No obstante el caudal de este aporte es muy irregular, pudiendo pasar de valores de unos pocos $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ a valores del orden de más de $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Los máximos valores se alcanzan entre finales de los meses de octubre y noviembre. La salida de agua del embalse tiene lugar esencialmente por turbinación de la central hidroeléctrica instalada en el embalse. Al igual que en las entradas, el caudal es poco uniforme pudiendo pasar de valores de unos pocos $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ a valores del orden de más de $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, su caudal medio es de $117,58 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La utilización de agua para irrigación es pequeña. El caudal medio es de $0,75 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Con caudales máximos del orden de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

El volumen medio de agua embalsada es de $156,96 \text{ hm}^3$. Presenta variaciones con valores máximos y mínimos de $162,31$ y $150,01 \text{ hm}^3$. La cota media de la superficie del agua es $241,86 \text{ m.s.n.m.}$, con valores máximo y mínimo de $242,14 \text{ m.s.n.m.}$ y $240,85 \text{ m.s.n.m.}$, por lo que la máxima variación de este parámetro es de $1,29 \text{ m}$.

Debido a la orografía del terreno inundado, en algunas zonas del embalse, las orillas son planas como corresponde a la inundación de alguna llanura. En otras zonas, las orillas están constituidas por las laderas de los montes entre los cuales discurre el embalse, que presentan grandes pendientes. Por último, en la parte del embalse conocida como El Salto del Gitano, el embalse se encajona entre dos roquedos cuarcíticos muy escarpados.

La parte más estrecha del embalse corresponde a la parte alta del embalse con una anchura que oscila entre 100 y 300 m . En la parte media y baja del embalse se suceden una serie ensanchamiento y estrechamientos debido a la inundación de llanuras y gargantas próximas al cauce del río Tajo. En estos puntos la anchura oscila entre 700 y 100 m .

El embalse tiene una longitud, medida a lo largo del antiguo cauce del río de 40.300 m .

Las propiedades del agua de los dos aportes principales son muy diferentes. El agua que procede del embalse de Valdecañas presenta una conductividad alta, próxima a $1.000 \mu\text{S cm}^{-1}$ mientras que la proveniente de Torrejón-Tietar presenta una conductividad muy baja, $200 \mu\text{S cm}^{-1}$. También existe gran diferencia en la temperatura del agua. La temperatura del agua del embalse de Torrejón-Tietar es más baja que la del agua contenida en el propio embalse de Torrejón-Tajo. Estas diferencias afectan a la densidad y por tanto a las fuerzas de flotabilidad del agua. El hecho de que el agua de Torrejón-Tietar presente baja conductividad eléctrica indica que su salinidad es baja, por lo que a igualdad de temperatura, el agua aportada por el embalse de Torrejón-Tietar debería flotar sobre la contenida en el embalse de Torrejón-Tajo. Por otra parte, si la temperatura del agua aportada por el embalse de Torrejón-Tietar es mucho menor que la del embalse de Torrejón-Tajo, la

densidad de la primera sería mayor y tendería a sumergirse por debajo del agua contenida en el embalse de Torrejón-Tajo. Si bien la densidad del agua es más sensible a la temperatura que a la salinidad, el comportamiento del embalse, en su zona más próxima al aporte de Torrejón-Tietar, dependerá de las condiciones ambientales. Este comportamiento también está afectado por energías externas que se introducen en el sistema debido a las operaciones de bombeo y turbinación.

En la parte alta del embalse, unos metros aguas arriba de la toma de agua del embalse de Arrocampo, atraviesa el embalse un puente moderno de hormigón correspondiente a la autovía A-IV. Debajo de este puente y en la margen izquierda del embalse se encuentra construido un muelle con rampa para la botadura de embarcaciones. Aguas arriba del puente de la autovía A-IV, se encuentra otro más antiguo, construido en piedra, por donde la carretera N-IV cruza el embalse.

La estructura de la toma de agua del embalse de Arrocampo está situada a 680 m aguas arriba de la confluencia de su descarga. La toma se realiza en profundidad y del centro de la sección del embalse. El avenamiento del canal de descarga del embalse de Arrocampo está situado en la margen derecha del embalse a una distancia de 29.300 m de la presa del embalse de Torrejón-Tajo. El canal de descarga es un canal rectangular de muy poca profundidad y una fuerte inclinación, por lo que el agua descargada fluye a su través en forma de cascada, produciendo una alta turbulencia en la masa de agua que contiene el embalse de Torrejón-Tajo. La corriente del inflow es fuerte y atraviesa el embalse, llegando su influencia a la margen contraria. Así mismo, en esta parte del embalse se produce gran cantidad de espuma.

Entre la descarga del embalse de Arrocampo y la presa de Torrejón Tajo, como a mitad del recorrido, en una ensenada del embalse, se encuentra construido un embarcadero de uso del personal de vigilancia del Parque Natural de Monfragüe.

La presa del embalse está situada en el término municipal de Torrejón el Rubio, provincia de Cáceres, próxima a la confluencia de los ríos Tajo y Tietar y es del tipo de arco-gravedad. La coronación tiene una longitud de 300 m y una altura máxima sobre los cimientos de 62 m. El aliviadero está dispuesto en la zona central de la presa y consta de cuatro vanos cerrados por compuertas que tienen una capacidad conjunta máxima de desagüe de $5.600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La construcción dispone de dos desagües de fondo que le proporcionan una capacidad máxima de desalojo de $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

La toma de agua para la central hidroeléctrica se realiza mediante un canal superficial que se inicia en la parte derecha de la coronación de la presa. La conducción de presión consta de cuatro tuberías forzadas que alimentan a los cuatro

grupos existentes con un caudal total de $350 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. El salto bruto máximo es de 50,5 m, con un salto neto máximo de 50 m. La potencia instalada es de 132 MW, en turbinación, y de 88.000 CV en bombeo. La energía producida en un año medio está comprendida entre 550 y 600 GWh.

En la margen izquierda, junto a la presa, existe una rampa para la botadura de embarcaciones. Justo enfrente, en lo alto de un escarpado, se observan edificaciones del antiguo poblado de la central hidroeléctrica de Torrejón-Tajo. El poblado es propiedad de Iberdrola y en la actualidad se encuentra abandonado.

No existe ninguna localidad en las márgenes del embalse, observándose edificaciones aisladas en ambas márgenes del embalse aguas arriba de la descarga del embalse de Arrocampo. Conviene destacar que gran parte del embalse se encuentra dentro de los dominios del Parque Natural de Monfragüe. Así mismo tiene importancia su riqueza piscícola.

1.3. Cuenca del río Júcar

En la cuenca del río Júcar se encuentra instalada la central nuclear de Cofrentes.

1.3.1. Central nuclear Cofrentes

El agua requerida para el funcionamiento de la central nuclear se obtiene del embalse de Embarcaderos, embalse al que también se retorna el agua sobrante, fotografía 2.4.



Fotografía 2.4.
Central nuclear
de Cofrentes
y embalse de
Embarcaderos.

El embalse de Embarcaderos se encuentra construido sobre el cauce del río Júcar, figura 1.8, aguas abajo del avenamiento del río Cabriel. En la actualidad la presa del embalse de Embarcaderos se encuentra sumergida de forma que el agua que contiene este embalse forma un solo cuerpo con la contenida en el embalse de Cortes II, fotografía 2.5. Si bien, la construcción de la antigua presa permanece, por lo que la masa de agua del embalse se encuentra partida hasta una cota de 326,5 m.s.n.m. y la lámina de agua sobre la edificación de la antigua presa es de unos pocos metros. Por lo que el estudio se ha centrado en ambos embalses.

El embalse de Cortes II se construyó con la finalidad de aprovechar el caudal y el desnivel del tramo del río Júcar comprendido entre el desagüe del salto de Cofrentes y la toma del salto de Millares, figura 2.2, y sustituye al antiguo salto de Cortes construido en 1920. La presa del embalse se encuentra en el término municipal de Cortes de Payas y la entrada en servicio de la central hidroeléctrica que alberga fue en el año 1988. La distancia desde la presa de Cortes II a la antigua de Embarcaderos, medida a lo largo del antiguo cauce del río es de 13.700 m. La longitud de agua embalsada en el antiguo embalse de Embarcaderos es de 6.300 m.

La creación del embalse de Cortes II y la muy favorable geomorfología de la zona constituyen la base para la concepción de un esquema de acumulación de energía por bombeo. La Muela de Cortes es una altiplanicie rodeada por el río Júcar y por sus afluentes por la margen derecha, que ha abierto profundas hoces, de modo que el desnivel entre la llanura y el cauce del río a su paso por la localidad de Cortes de Pallas es de unos 600 m, con una distancia en planta de tan sólo 800 m. Esta configuración ha sido aprovechada para emplazar la central hidroeléctrica de La Muela. Se trata de un sistema de acumulación por bombeo puro, que permite trasladar la energía producida durante la noche por centrales térmicas y nucleares a horas de máxima demanda.

*Fotografía 2.5.
Antigua presa
Embarcaderos y
estructura de toma
de agua de la cen-
tral nuclear de
Cofrentes.*



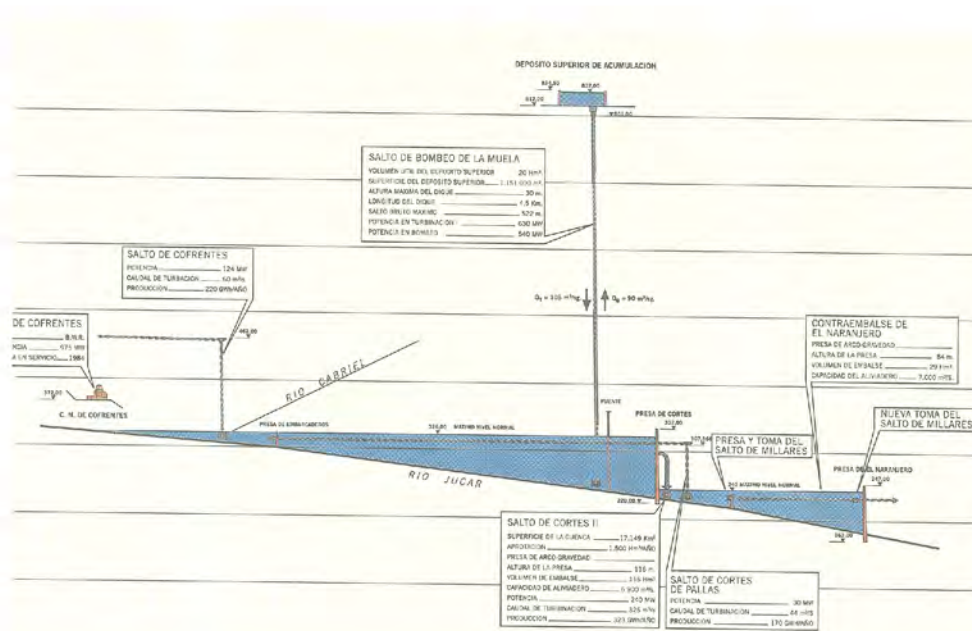


Figura 2.2. Esquema de aprovechamiento hidroeléctrico en el río Júcar.

El embalse de Cortes II recoge las aportaciones de una superficie de la cuenca del río Júcar de 17.144 km², con un aporte medio anual de 1.500 hm³ que corresponde a un caudal medio anual de 23,7 m³ s⁻¹ y su volumen total es de 116 hm³ lo que arroja un tiempo medio de residencia del agua en el embalse de 56,65 días. El volumen de agua embalsada, durante el período de estudio, presenta variaciones con valores máximos y mínimos de 116,445 y 98,909 hm³, por lo que la máxima diferencia en el volumen de agua embalsada es de 17,536 hm³, con un volumen medio de agua embalsada de 109,445 hm³. Las cotas máximas y mínimas del embalse son 326 y 314 m.n.s.m., respectivamente. Durante el periodo de estudio, la cota media de la superficie del agua fue 324,624 m.n.s.m., con valores máximo y mínimo de 325,79 m.n.s.m. y 322,66 m.n.s.m., por lo que la máxima variación de este parámetro es de 3,13 m. La superficie que ocupa el embalse es 680 ha. La pendiente de línea de energía es 0,0012 m m⁻¹.

Los principales aportes del embalse de Cortes II son los que recibe a través del embalse de Embarcaderos y que provienen de los ríos Júcar y Cabriel, ríos cuyos caudales son regulados por presas situadas aguas arriba de Embarcaderos, salto del Molinar para el río Júcar y salto de Cofrentes para el río Cabriel. El aporte del río Júcar es muy bajo entre 200 y 300 l s⁻¹. Este bajo caudal es debido a la presencia, aguas arriba, de la presa de El Molinar. Desde dicha presa se desvía el agua hacia el Salto de Cofrentes, construido sobre el río Cabriel, y solamente es vertida al río Júcar una pequeña cantidad de agua para mantener una fina película de agua en el cauce del río y mantener llenas las pozas. Por lo que el aporte más significativo le llega al embalse a través del río Cabriel. El caudal medio turbinado por el salto de Cofrentes es de 23,07 m³s⁻¹. El caudal

oscila entre $76,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y $0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La central hidroeléctrica de la Muela bombea y turbina a/y desde su depósito superior. Los caudales de entrada y salida son similares; los caudales de entrada y salida medios son de $18,54$ y $18,26 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente, mientras que los caudales máximos de entrada y salida son $76,9$ y $79,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Ambos caudales de entrada y salida son muy irregulares en su cuantía presentando fuertes oscilaciones. De menor importancia es el aporte de la rambla del Oroque, a 1.400 m de la presa de Embarcaderos. El resto de aportes es debido a ramblas y barrancos con caudales intermitentes, Rambla Real y del Barrancazo y barranco de la Señora, por su margen derecha y Barranco Bujeta y Cueva Negra por su margen izquierda.

Las principales tomas de agua son las de las centrales de Cofrentes y de La Muela. A la altura de la localidad de Cortes de Pallas existe una toma de agua para regadío.

La inundación de ramblas y barrancos confiere al embalse una morfología dendrítica. La cola del embalse constituido por el cauce inundado del río Júcar, fotografía 2.5, es la parte más estrecha del embalse. Así la sección del embalse donde se encuentra la descarga de la central nuclear de Cofrentes tiene 25 m de anchura. Aguas abajo, el embalse se ensancha progresivamente. A la altura del puente de la Isla la anchura es de 150 m y la de la sección mayor del codo de la Isla es de 275 m . La parte del embalse que constituía el cuerpo principal del embalse de Embarcaderos tiene anchuras comprendidas entre 325 y 800 m . En la zona próxima a la antigua presa de Embarcaderos, donde se encuentra ubicada la toma de agua de la central nuclear, la anchura es de 225 m , fotografía 2.5. Aguas abajo de la antigua presa de Embarcaderos, el embalse transcurre por el cauce inundado del río Júcar y se estrecha hasta alcanzar el cuerpo principal del embalse a la altura de la central hidroeléctrica de La Muela. Esta parte del embalse tiene una longitud de 6.300 m y presenta anchuras comprendidas entre 75 y 250 m . En esta zona cabe destacar el embolsamiento, de unos 2.000 m de longitud, que se forma en la zona de avenamiento de la Rambla Real y el arroyo de los Vagos situado a 6.500 m de la presa de Cortes II y a 13.500 m del punto de descarga de la central nuclear y que podría ser un punto de acumulación de contaminantes, figura 1.8. El cuerpo principal del embalse, tiene una longitud de 2.000 m y una anchura de entre 375 y 400 m . Su morfología es regular.

La Confederación Hidrográfica del Júcar tiene instalada tres estaciones de aforo. Una en el cauce del río Cabriel, estación 112, y otra en el cauce del río Júcar, estación 39. Una estación de control de la calidad del agua y aforo en el río Júcar, estación 144. Una estación de la Red de Alerta Automática en la confluencia de los ríos Júcar y Cabriel, estación 810.

Las localidades de Cofrentes y de Cortes de Pallas son las únicas localidades próximas al embalse. La localidad de Cofrentes que se sitúa entre los ríos Júcar y Cabriel, en una península formada en la unión de los dos ríos, tiene 990 habitan-

tes. Cortes de Pallas tiene una población de 656 habitantes y se encuentra construida en la ladera de la altiplanicie de La Muela. A orillas del cuerpo principal del embalse, frente a la estructura de la central hidroeléctrica de La Muela, se ubican unas construcciones que corresponden a un albergue de vacaciones.

En la parte inundada del cauce del río Júcar hay un puente que nace próximo al pk 135 de la carretera N-330 y que da acceso a la central nuclear de Cofrentes. Aguas abajo del puente se encuentra el canal de descarga de la central nuclear. Sobre el río Cabriel y justamente sobre su desembocadura en el río Júcar se encuentra un segundo puente de la carretera N-330, pk 138. Aguas abajo de este puente permanecen los restos de una presa de un antiguo contraembalse. Así mismo, se puede considerar que a partir de dicho puente se encuentra la zona inundada por el antiguo embalse de Embarcaderos.

El antiguo embalse de Embarcaderos tiene un volumen de embalse de 9 hm^3 y volumen útil de $4,56 \text{ hm}^3$. Su superficie es de $2,55 \text{ km}^2$. Recoge aportaciones de una cuenca de 16.950 km^2 , con un aporte medio anual de $1,32 \text{ hm}^3$ y un caudal mínimo mensual medio de $15,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La antigua presa fue terminada en 1952 y es de tipo gravedad, con una altura de 30,5 m, cota de coronación de 326,5 m.s.n.m. y una longitud de coronación de 65 m. Aunque en la actualidad se encuentra unido al embalse de Cortes II, la construcción de la antigua presa permanece por lo que la masa de agua del embalse se encuentra partida hasta una cota de 326,5 m.s.n.m. y la lámina de agua sobre la edificación de la antigua presa es de unos pocos metros. En su margen izquierda se encuentra construida una zona de picnic, mientras en la margen derecha, a la altura de la presa de Embarcaderos, se encuentra la toma de agua de la central nuclear de Cofrentes, fotografía 2.5.

La central hidráulica de La Muela está constituida por un embalse superior cerrado por un dique de escollera y por una central subterránea situada en la margen derecha del embalse de Cortes II, del que se abastece de agua. El depósito superior de La Muela tiene una capacidad útil normal de 20 hm^3 y una capacidad útil extraordinaria de 23 hm^3 , lo que permite el funcionamiento ininterrumpido de la central durante 56 horas. La excavación tiene un volumen de $4,225 \text{ hm}^3$ y está rodeada por un dique perimetral de 4.500 m de longitud y 30 m de altura. La central subterránea aloja tres grupos reversibles que proporcionan una potencia en turbinación de 630 MW ($Q_T = 105 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) con un salto bruto máximo de 522 m. En bombeo los grupos demandan una potencia de 540 MW para ascender $90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ al depósito superior con el salto bruto antes indicado. La longitud de la tubería de conexión entre los embalses de Cortes II y de La Muela es de 750 m.

Entre la central hidroeléctrica de La Muela y la presa del embalse de Cortes II se encuentra construido un puente de la carretera CV- 425. El puente, de una longitud de

281 m, está construido en hormigón y se eleva 31 m sobre la cota máxima del embalse. El puente se asienta sobre dos pilas que dejan tres vanos dos de 76,50 m y uno, el central, de 128 m de luz. Por la margen derecha, el puente desboca en un túnel tras pasado el cual hay una derivación que da acceso a la central hidroeléctrica de La Muela. Superada esta desviación la carretera alcanza la localidad de Cortes de Pallas donde muere.

La presa del embalse de Cortes II está situada en el término municipal de Cortes de Pallas, provincia de Valencia, y es del tipo de arco-gravedad. La coronación tiene una longitud de 312 m y una altura máxima sobre los cimientos de 116 m. El aliviadero está dispuesto en la zona central de la presa. Consta de cuatro vanos cerrados por compuertas que tienen una capacidad conjunta máxima de desagüe de $6.900 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ con el nivel del agua en la cota 329 m.s.n.m. La construcción dispone de dos desagües de fondo que le proporcionan una capacidad máxima de desalojo de $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La disipación de energía de vertido se realiza en un cuenco amortiguador que permite restituir el caudal al cauce sin daño.

La base de la toma de agua está situada en el lado izquierdo de la presa. La conducción de presión se inicia en la toma de agua y consta de dos tuberías forzadas que alimentan a los dos grupos existentes un caudal conjunto de $326 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. El salto bruto máximo es de 96 m y el mínimo de 74 m, que se corresponden con unas cotas de explotación máxima y mínima de 326 y 314 m.s.n.m., respectivamente. La potencia instalada es de 240 MW y la energía producible en un año medio de 323 GWh. Aguas arriba de la presa de Cortes II, el río Júcar está regulado por el embalse del Molinar y el río Cabriel por el embalse de Cofrentes. Aguas abajo, la alteración del régimen uniforme de caudal circulante que supone una central de pocas horas de utilización obligó a la construcción de un dispositivo de regulación, el contraembalse de El Naranjero, que tiene una capacidad de $26,27 \text{ hm}^3$. La coronación de la presa es fácilmente accesible utilizando una carretera particular propiedad de la empresa explotadora.

Los principales usos del agua del embalse, navegable a remo y a motor, son la obtención de energía eléctrica de origen hidroeléctrico, centrales hidroeléctricas de Cortes II y La Muela, y el abastecimiento de la central nuclear de Cofrentes. Los usos de regadío se limitan a la cola del embalse en la zona del antiguo cauce del río Cabriel y en la zona próxima a La Muela y a la altura de la localidad de Cortes de Pallas.

2. FLUJOS DE AGUA EN LOS SISTEMAS HIDROLÓGICOS

Este apartado realiza una descripción general de los flujos de agua circulantes por los tramos de sistemas hidrológicos estudiados. En el primer subapartado se analizan los caudales circulantes en el río Ebro y en el segundo los flujos de agua en los embalses estudiados.

2.1. Caudales en el río Ebro

En el río Ebro se han estudiado tres tramos con régimen de flujo regulado. La regulación del caudal se realiza mediante la descarga de los embalses instalados agua arriba del tramo considerado. Los tramos de río son.

- Presa de PuenteIarrá-dique de Cabriana.
- Central hidroeléctrica de Cabriana-cola del embalse de El Cortijo.
- Ascó-Amposta.

Para el análisis de los caudales circulantes en el río Ebro se han seleccionados los años 1999 y 2000. El análisis se realiza mediante los caudales medios mensuales que la Confederación Hidrográfica del Ebro ofrece en su página web.

En el primer tramo no se encuentra instalada ninguna estación de aforo de la Confederación Hidrográfica del Ebro, por lo que no se puede mostrar la variación anual del caudal circulante por este tramo. No obstante, en el tramo no existen aportes importantes y se encuentra confinado por las centrales hidroeléctricas de PuenteIarrá y de Cabriana. Estas centrales hidroeléctricas, en su operación, se limitan a aprovechar el agua descargada por la central hidroeléctrica de Sobrón, por lo que el caudal circulante en el tramo se puede asimilar al caudal de agua descargado por la central hidroeléctrica de Sobrón que se muestra en el apartado siguiente, figura 2.6.

En el tramo comprendido entre la central hidroeléctrica de

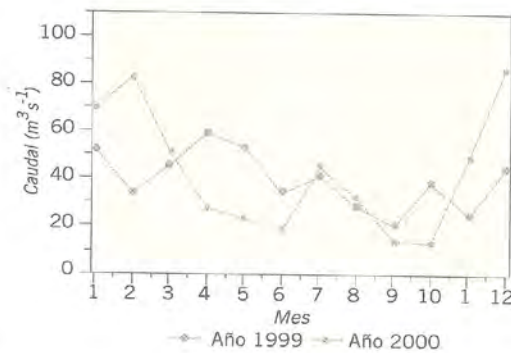


Figura 2.3. Variación temporal del caudal del río Ebro en la estación de aforos instalada en Miranda de Ebro.

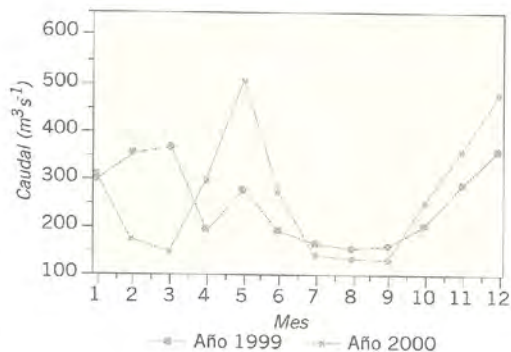


Figura 2.4. Variación temporal del caudal del río Ebro en la estación de aforos de Ascó.

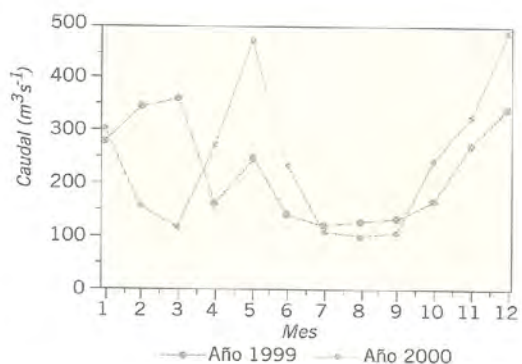


Figura 2.5. Variación temporal del caudal del río Ebro en la estación de aforos de Tortosa.

Cabriana y la cola del embalse de El Cortijo, la Confederación Hidrográfica del Ebro tiene instalada una estación de aforo en Miranda de Ebro, estación de aforo número 1. La figura 2.3 muestra la variación del caudal en dicha estación de aforo.

En el tramo comprendido entre Ascó y Amposta la Confederación Hidrográfica del Ebro tiene instaladas dos estaciones: una en Ascó, estación de aforo número 163 y otra en Tortosa, estación de aforo número 27. Las figuras 2.4 y 2.5 muestran las variaciones del caudal en dichas estaciones de aforo.

En todas las estaciones de aforo e independientemente de oscilaciones puntuales, la tendencia general de la variación del caudal es a disminuir a lo largo de la primavera, para volver a aumentar a lo largo del final del otoño. En la estación de Miranda de Ebro, el caudal mínimo se mide en el mes de septiembre. En el tramo Ascó-Amposta, entre los meses de julio y septiembre el caudal permanece constante y en su valor mínimo.

Si se analizan de forma conjunta las tres figuras, se puede observar el fuerte aumento de caudal que existe entre las estaciones de Miranda de Ebro y Ascó, lo que indica que existen aportes importantes entre ambas estaciones. El caudal es ligeramente superior en la localidad de Tortosa que en la de Amposta.

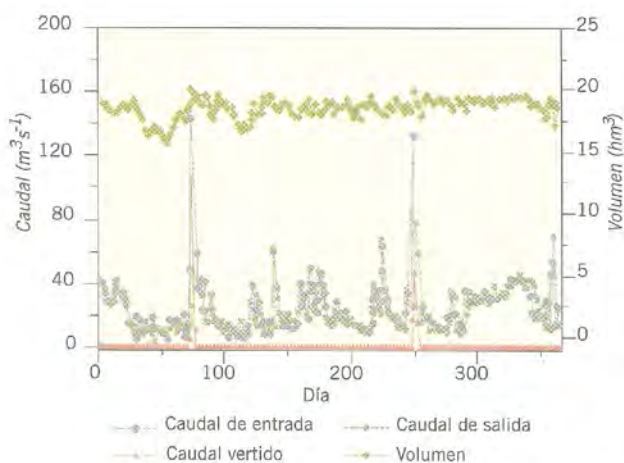
En las tres estaciones se aprecia la influencia de la climatología, el año 1999 fue más seco que el año 2000. Esta diferencia se aprecia en los tres caudales analizados.

2.2. Flujos de agua en embalses

En la figura 2.6 se muestran los caudales de entrada, salida y vertido al cauce del río Ebro en el embalse de Sobrón, durante el periodo comprendido entre el día 9 de enero de 1999 y el mismo día del año 2000.

Conviene destacar dos características del régimen de caudales.

Figura 2.6. Flujos de agua y volumen de agua embalsada en el embalse de Sobrón. Día de inicio (día cero en el eje de abscisas): 09/01/99



- Los caudales de entrada y salida del embalse son prácticamente iguales, lo que conduce a que el volumen de agua embalsada se mantenga prácticamente constante, figura 2.6.

- El caudal vertido al cauce del río Ebro es cero o un valor muy bajo, excepto en dos fechas que coinciden con un aumento espectacular del caudal de entrada, lo

que conduce a pensar que ambos alivijs del embalse se realizaron en épocas de posible avenida.

Los valores medio, máximo y mínimo de los caudales de entrada y salida al embalse son prácticamente iguales. La cantidad de agua embalsada oscila alrededor de su valor medio, como máximo, $\pm 15 \text{ hm}^3$.

Las figuras. 2.7 a 2.10 contienen los movimientos de caudal de los embalses de Entrepeñas, Bolarque, Zorita Hidráulica y Almoguera producidos en el ciclo anual en que se realizó la parte más importante de la experimentación presentada en esta memoria, y que se corresponde con el periodo comprendido entre octubre de 1997 y octubre de 1998. Como ejemplo se han elegido los meses de diciembre, marzo, junio y octubre, como representativos de las diferentes épocas del año.

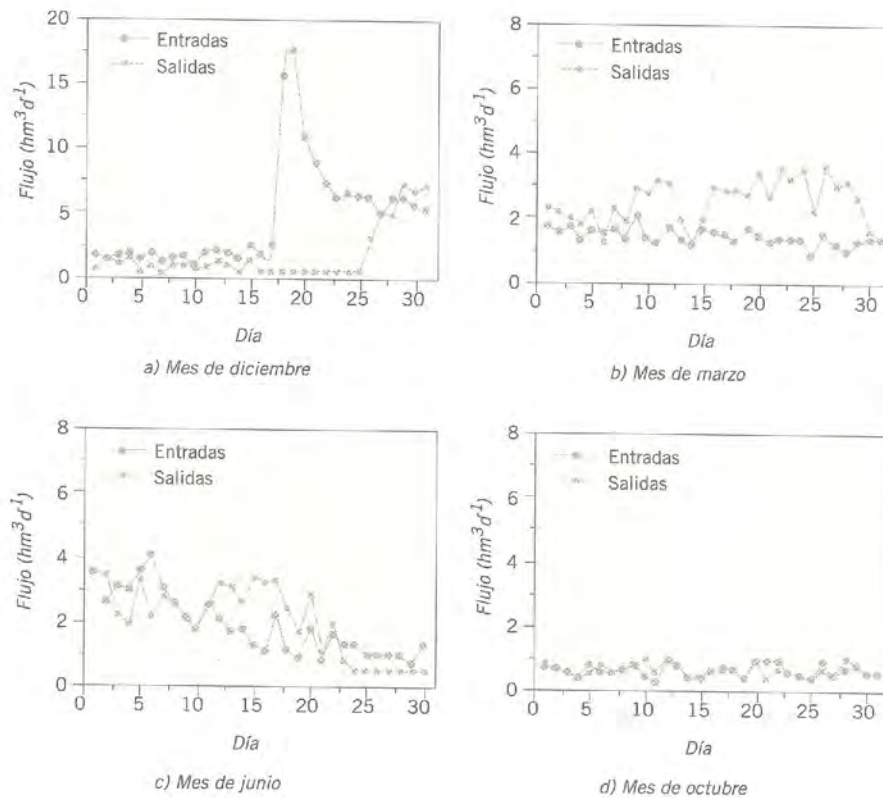


Figura 2.7. Flujos de agua en el embalse de Entrepeñas.

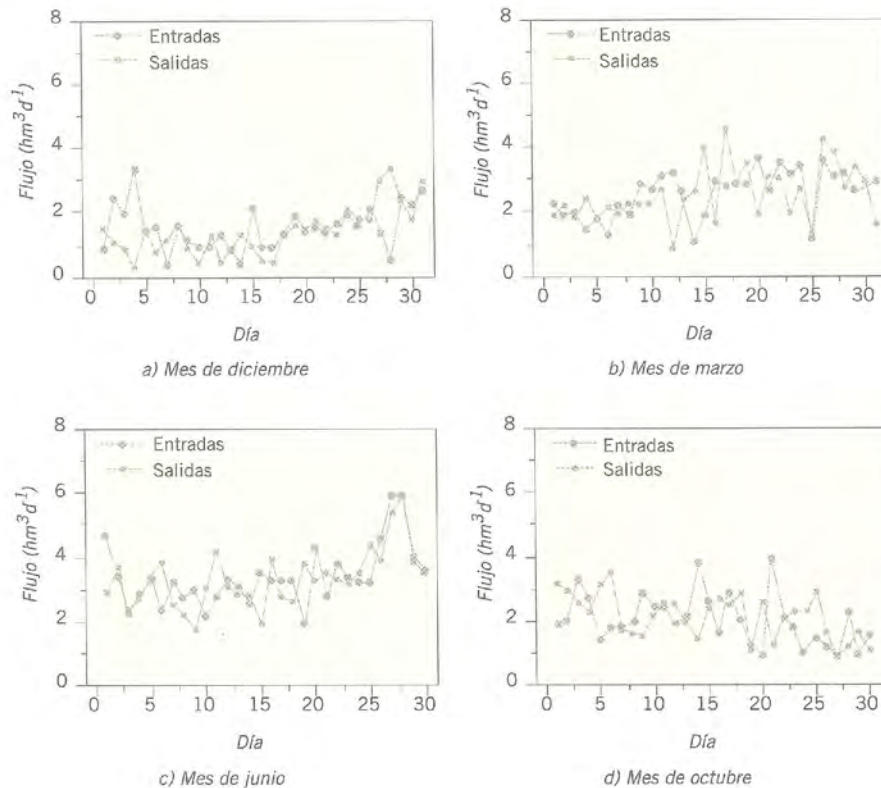
Los aportes recibidos por el embalse de Entrepeñas no están regulados. El embalse de La Ermita, situado aguas arriba, sólo tiene la función de mantener el remanente de agua necesario para garantizar el suministro a la central nuclear de Trillo pero, dado que siempre está lleno, no realiza una retención efectiva del agua circulante. En estas condiciones, los aportes recibidos por el embalse de

Entrepeñas son función únicamente de la climatología y, como tal, son más abundantes en invierno y primavera que durante el verano y principios del otoño. Como puede apreciarse en la figura. 2.7 a, estos aportes pueden alcanzar valores especialmente significativos en días de precipitaciones intensas.

Las gráficas relativas a los meses de marzo y junio, figuras. 2.7 b y c, muestran una importante actividad en la descarga del embalse, que se atenúa claramente a finales de este último mes. El tránsito de agua durante el mes de octubre es muy bajo al no corresponderse con una época de precipitaciones importantes y el embalse libera agua con el fin de mantener el caudal ecológico en cuantía muy similar a los aportes recibidos.

El conjunto de figuras correspondientes al embalse de Bolarque, figuras 2.8 a, b, c, y d, presentan variaciones complejas con las siguientes características:

Figura 2.8.
Flujos de agua en
el embalse de
Bolarque.



- No pueden detectarse picos del caudal aportado en ninguna época del año.
- Tanto las entradas como las salidas presentan variaciones importantes entre fechas próximas.

Este conjunto de particularidades detectadas en los flujos de operación del embalse de Bolarque pueden explicarse teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- El embalse de Bolarque no dispone de otros aportes significativos que los caudales desaguados por los embalses de Entrepeñas y Buendía. En ambos casos se dispone de capacidades de almacenamiento muy elevadas, por lo que la recepción de cantidades importantes de agua en periodos de tiempo relativamente cortos no implica necesariamente un aumento de las descargas.
- El embalses de Bolarque se haya interconectado, a través de la central hidráulica Bolarque II, con el embalse de La Bujeda, del que parte el transvase Tajo-Segura. El tránsito de agua entre ambos embalses responde tanto a propósitos de transvase como de producción de energía eléctrica, por lo que este tipo de movimientos son relativamente frecuentes.

Estas características proporcionan a la operación del embalse de Bolarque características particulares que dificultan su correlación con las épocas del año, aunque queda claro que los niveles de actividad durante la primavera y el verano son ligeramente mayores que en el invierno y otoño.

El embalse de Zorita Hidráulica debido a su escasa capacidad útil y a la presencia de la central nuclear José Cabrera tiene un escaso margen de maniobra a la hora de variar su cota de llenado, que siempre se mantiene muy próxima a los 600 m.s.n.m. Por esta razón, el embalse se ve obligado a equilibrar diariamente aportes y descargas, tal y como puede apreciarse en la figura. 2.9.

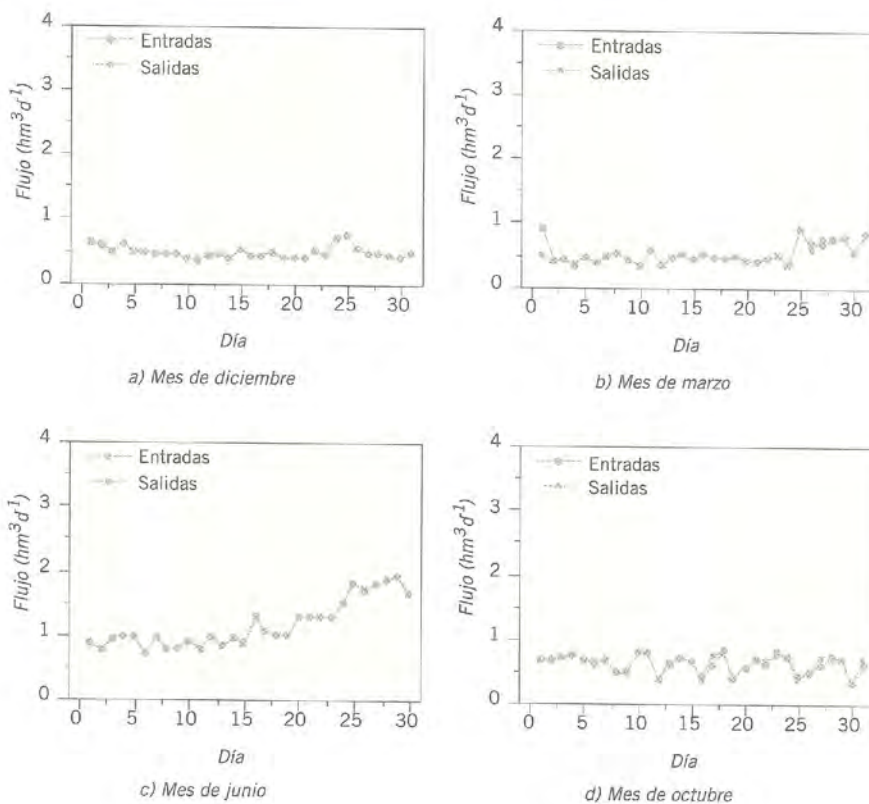
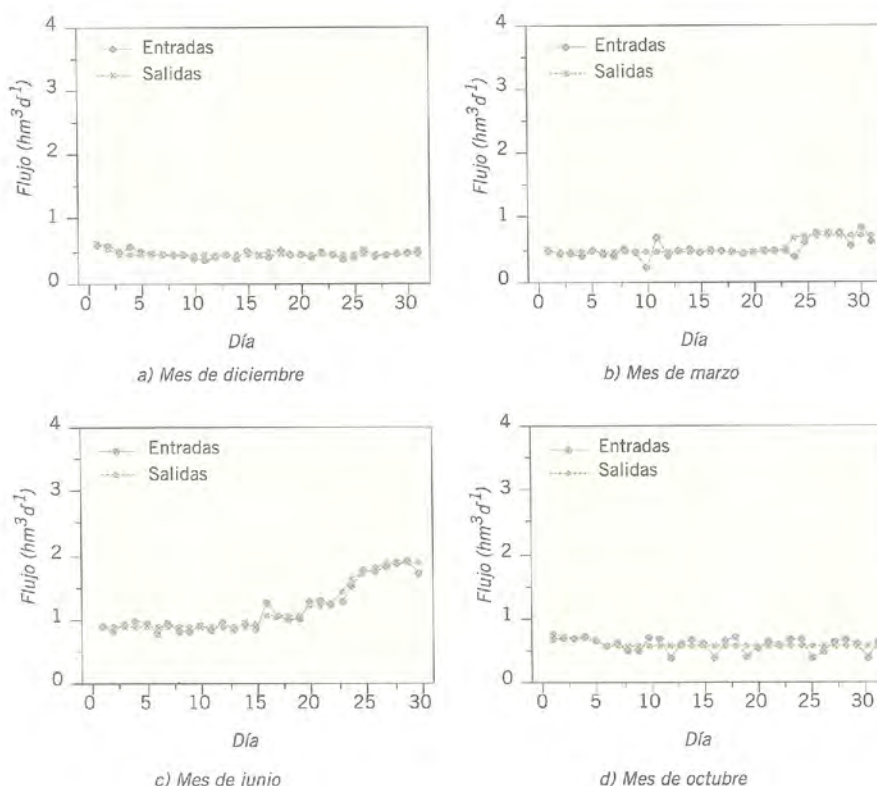


Figura 2.9.
Flujos de agua en el embalse de Zorita Hidráulica.

El embalse de Almoguera presenta numerosas características en común con el embalse de Zorita Hidráulica, sobre todo en aquellas referentes a una capacidad útil muy limitada, lo que obliga, como en el caso anterior, a mantener el embalse prácticamente lleno. El hecho de que este embalse no tenga que garantizar el suministro de agua a una central nuclear y que su capacidad de embalse sea ligeramente mayor permite ciertas diferencias, siempre dentro de una misma tendencia, entre los aportes y los gastos diarios, figura 2.10.

Figura 2.10.
Flujos de agua en el embalse de Almoguera.



La Confederación Hidrográfica del Tago no dispone de información acerca de los flujos de agua en el embalse de Estremera, no obstante, como entre la salida del embalse de Almoguera, a través de las turbinas de la central hidroeléctrica, y la presa de Estremera no existen aportes ni detracciones importantes, se puede tomar como caudal de entrada al embalse de Estremera la salida de él de Almoguera, figura 2.10. Independientemente de la época del año que se considere, el embalse se descarga por rebose, por lo que el caudal de salida es el mismo que el de entrada. El flujo de agua en el embalse está controlado por las necesidades de regadío en la zona. El caudal se mantiene constante y en $6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ durante parte del otoño, el invierno y principio de primavera. A partir del mes de abril el cau-

dal aumenta hasta que a finales del mes de julio alcanza un valor de $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Este caudal se mantiene hasta el mes de septiembre, en que vuelve a disminuir hasta el valor de $6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

En el embalse de Arrocampo, en condiciones normales de operación de la central nuclear de Almaraz, el agua circula con un caudal constante de $92,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Si la temperatura en la presa es inferior a $27 \text{ }^\circ\text{C}$, el agua se recircula en el embalse. En el caso contrario parte del agua se vierte al embalse de Torrejón-Tajo y a la vez se toma de este embalse la misma cantidad de agua para mantener el caudal constante. La constancia de caudal hace que el volumen de agua embalsada y la cota superficial de agua se mantengan constantes durante todo el año en valores de $35,5 \text{ hm}^3$ y 255 m.s.n.m. , respectivamente.

La descarga y toma de agua del embalse de Arrocampo presentan el mismo valor por lo que no deben ser consideradas desde el punto de vista del balance hídrico, por lo tanto, el embalse de Torrejón-Tajo tiene como aportaciones: la salida de turbinas del embalse de Valdecañas y el agua bombeada desde el embalse de Torrejón-Tietar. En la figura 2.11 se han representado ambos caudales así como el total de entrada. El caudal aportado por ambos es intermitente, sobre todo el aportado por el embalse de Torrejón-Tietar que descarga esporádicamente, salvo en épocas de avenida, cada cierto periodo de tiempo que pueden llegar a ser de 14 días. La descarga de Valdecañas también es intermitente, pero en este caso los periodos de tiempo en los que el caudal es cero no superan los tres o cuatro días. Los mayores aportes corresponden a la descarga del embalse de Valdecañas.

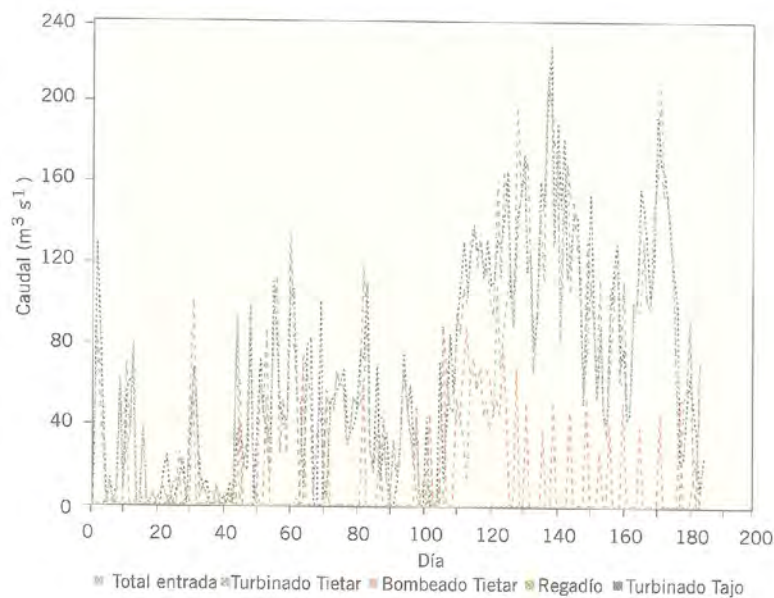
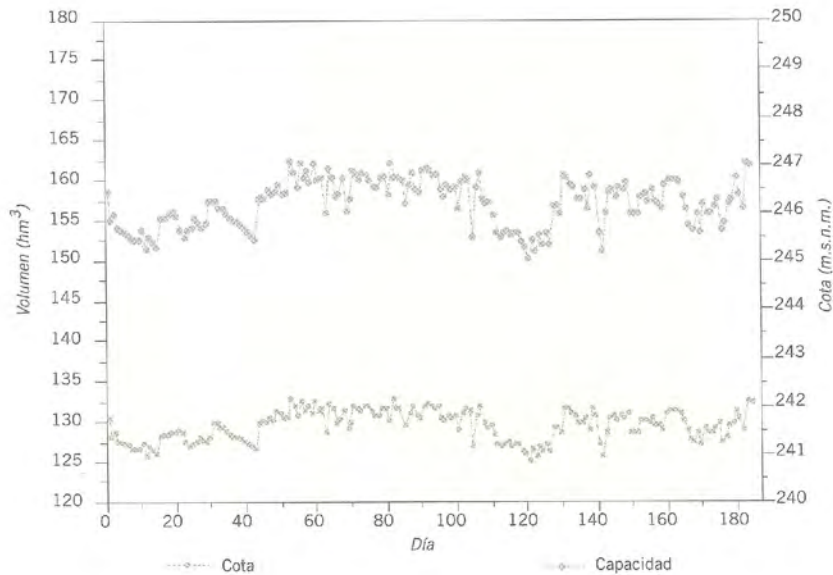


Figura 2.11. Flujos de agua en el embalse de Torrejón-Tajo. Día de inicio (día cero en el eje de abscisas): 01/07/01

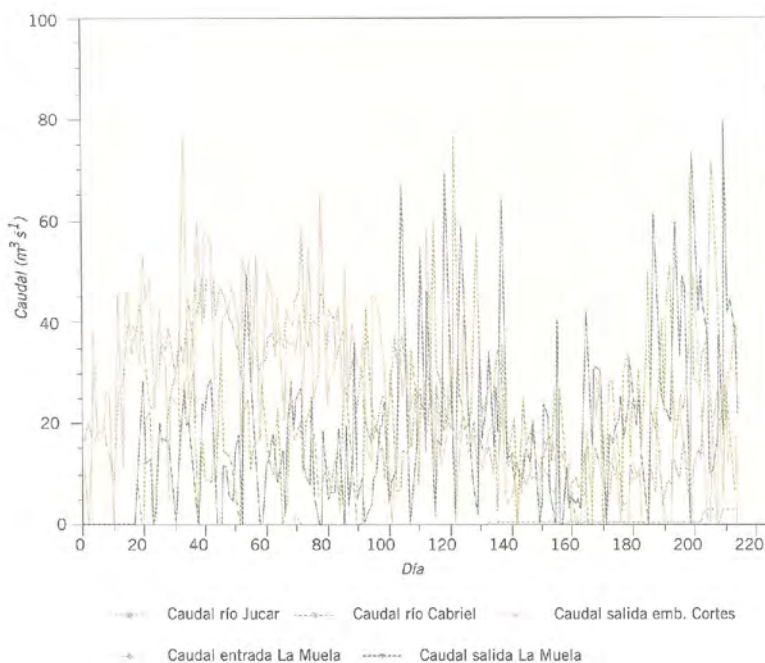
Figura 2.12. Variación temporal del volumen de agua embalsada y cota superficial de agua en el embalse de Torrejón-Tajo. Día de inicio (día cero en el eje de abscisas): 01/07/01



En la figura 2.12 se muestra la evolución temporal del volumen y de la cota superficial de agua en el embalse de Torrejón-Tajo. Ambos parámetros varían en función de la época del ciclo anual y también, presentan oscilaciones puntuales, diarias de cierta importancia. La cantidad de agua embalsada oscila alrededor de su valor medio, como máximo $\pm 7 \text{ hm}^3$.

La descarga de agua en el embalse de Torrejón-Tajo tiene lugar a través de la central hidroeléctrica del mismo nombre. También existe una detracción de agua

Figura 2.13. Flujos de agua en el embalse de Cortes II. Día de inicio (día cero en el eje de abscisas): 01/06/01



para regadío, pero de muy escasa importancia, figura 2.11. La descarga a través de la central hidroeléctrica presenta una variación temporal semejante a la del caudal total que entra al embalse.

En el embalse de Cortes II se encuentra instalada la central hidroeléctrica reversible de La Muela, los caudales de entrada y salida de esta central hidroeléctrica presentan valores muy próximos, figura 2.13, por lo que no se la considera para el balance hídrico. Los aportes del embalse son el río Júcar y el río Cabriel. El aporte de río Júcar es prácticamente despreciable, figura 2.13. Por lo que la principal entrada de agua al embalse de Cortes II es el aporte del río Cabriel, cuyo caudal se encuentra regulado por el salto de Cofrentes. El caudal de salida del embalse de Cortes II presenta una evolución temporal semejante al caudal aportado por el río Cabriel.

La variación del volumen de agua embalsada y de la cota superficial de agua en el embalse de Cortes II y en el depósito de La Muela se muestran en la figura 2.14. Los volúmenes de agua embalsada en ambos embalses presentan oscilaciones que están relacionados con la operación de las centrales hidroeléctricas. La cantidad de agua embalsada oscila alrededor de su valor medio, como máximo, $\pm 8.6 \text{ hm}^3$.

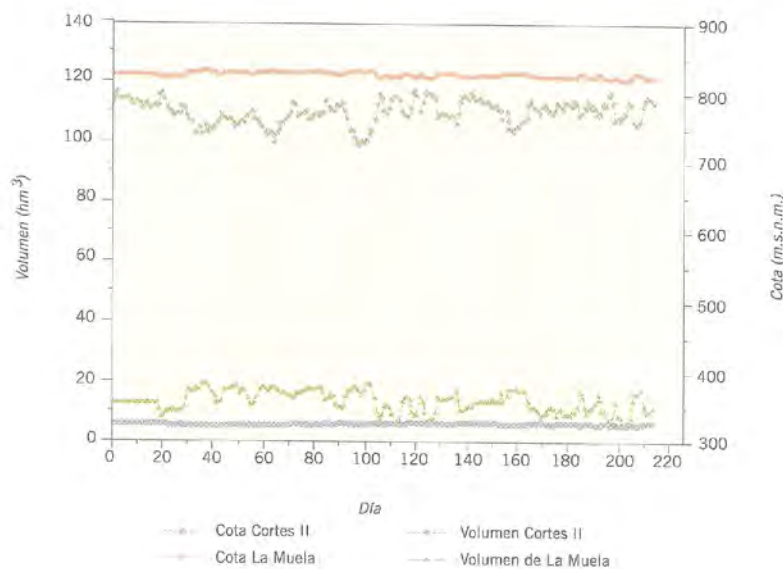


Figura 2.14. Variación temporal del volumen de agua embalsada y cota superficial de agua en el embalse de Cortes II y depósito de la Muela. Día de inicio (día cero en el eje de abscisas): 01/06/01

3. CONDICIONES METEOROLÓGICAS

Las condiciones meteorológicas constituyen uno de los principales condicionantes del estado físico y del comportamiento dinámico de lagos y embalses. Los cambios estacionales del flujo calorífico hacia / desde el embalse impulsan y destruyen periódicamente el estado estratificado, al mismo tiempo que la energía impartida por el viento sobre la superficie del agua se constituye en la fuerza impulsora de la mayoría

de los procesos de mezcla. En la tarea de Documentación se ha recopilado información acerca de las siguientes condiciones meteorológicas: irradiación solar, temperatura ambiente y velocidad del viento a 10 m de altura y presión atmosférica.

Los datos de irradiación solar y presión atmosférica han sido suministrados por las estaciones que el Instituto Nacional de Meteorología tiene instaladas en los siguientes lugares:

- Torrejón de Ardoz, Madrid.
- Villafraía, Burgos.
- Cáceres, carretera de Trujillo.
- Manises, Valencia.

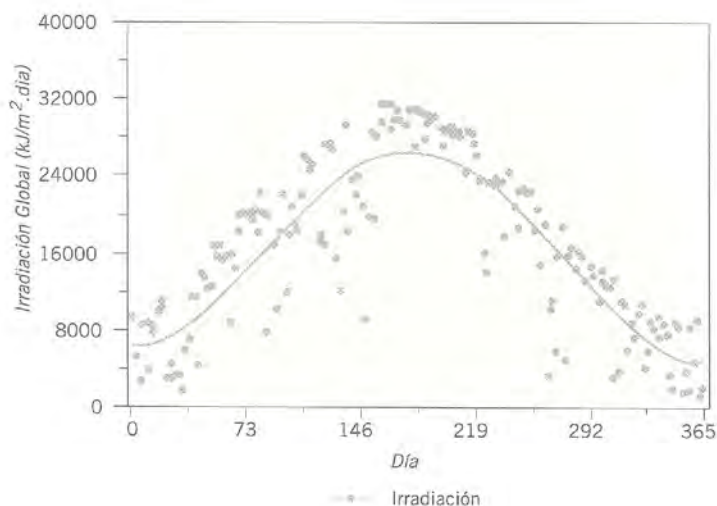
La selección de las estaciones meteorológicas se realizó en función de la proximidad al embalse considerado. No obstante, dada la limitación en el número de estaciones de la Red Nacional con medida de irradiación solar, las estaciones distan bastantes kilómetros de los embalses. El error cometido no es excesivamente grande ya que esta variable presenta pequeñas oscilaciones dentro de determinadas regiones naturales.

Los valores de temperatura ambiente y de velocidad del viento que se han utilizado en el trabajo son las medidas a 10 m de altura en las estaciones meteorológicas que las centrales nucleares tienen instaladas en sus proximidades.

3.1. Irradiación solar

La energía radiante que, procedente del sol, alcanza la superficie terrestre presenta una notable dispersión en sus valores diarios, pero muestra un claro patrón estacional, como puede apreciarse en la figura 2.15, en la que se muestra la evolución con el tiempo de este parámetro en la estación meteorológica de Torrejón de Ardoz. En el resto de estaciones los valores de este parámetros son algo diferentes, pero su evolución temporal es semejante a la mostrada en la figura 2.15.

Figura 2.15.
Irradiación solar global diaria en la zona del embalse de Entrepeñas.



Esta fuente de energía alcanza sus valores mínimos durante el periodo invernal y se hace máxima en el verano, durante los meses de junio y julio.

La tendencia media de la intensidad de la energía radiante a lo largo del ciclo anual puede ser ajustada a un polinomio de cuarto grado, representado en la figura mediante trazo continuo.

3.2. Temperatura ambiente

En la figura 2.16 se muestra la evolución de la temperatura ambiente para la zona del embalse de Entrepeñas, datos suministrados por la central nuclear de Trillo. La temperatura ambiente responde a los cambios estacionales en el suministro de energía solar de forma que las temperaturas más altas de todo el ciclo anual se registran durante los meses de julio y agosto, con un cierto retraso sobre el máximo de intensidad de la radiación solar, que se produce en el mes de junio. La diferencia media de temperaturas entre los valores máximos y mínimos diarios ha presentado un valor de 12,7 °C.

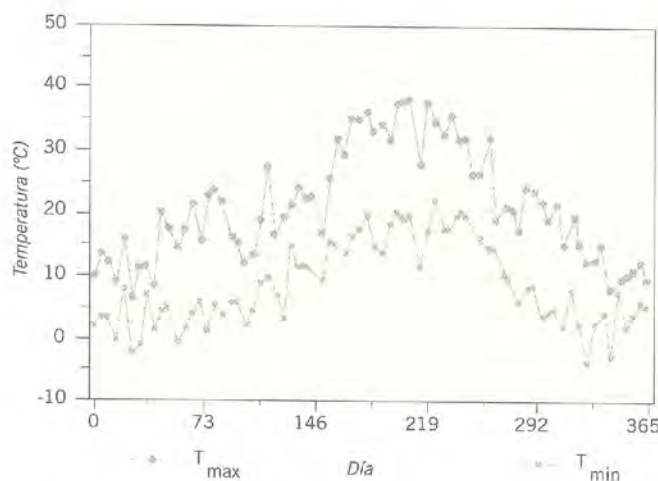


Figura 2.16. Variación anual de las temperaturas atmosféricas máxima y mínima en la zona del embalse de Entrepeñas.

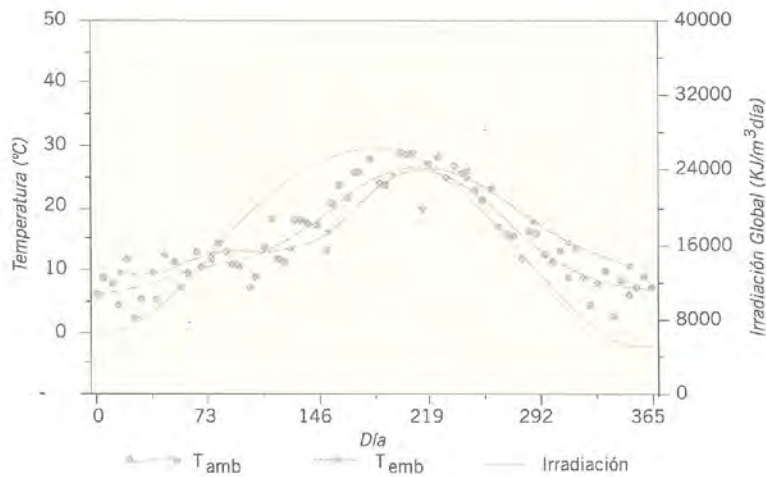
La elevación de la temperatura de la atmósfera y de la superficie terrestres responde al efecto acumulado del total de energía recibida, lo que ocasiona este retraso temporal en los valores máximos de la temperatura ambiente respecto a los de la insolación.

La elevación de la temperatura del embalse se debe a los aportes externos de calor, tanto en forma de energía radiante como de calor sensible. La figura 2.17 muestra una comparativa de la evolución estacional de estas dos fuentes energéticas (temperatura ambiente y energía solar) con respecto a la temperatura de la superficie del embalse de Entrepeñas, que ha estado sometido a estas condiciones.

El gráfico muestra un claro retraso de la temperatura del embalse respecto a la atmosférica media, retraso que se hace más evidente respecto al máximo de la

radiación solar. Como se aprecia en la figura 2.17, los cambios estacionales de temperatura el medio hídrico son menos importantes que en el medio aéreo, de modo que durante la época fría la temperatura del agua es más alta que la de la de la atmósfera, mientras que en el verano la elevación térmica del medio hídrico es menor que la atmosférica.

Figura 2.17. Variación estacional de las temperaturas ambiente y de la superficie del agua embalsada en el embalse de Entrepeñas.



La temperatura ambiente responde a los cambios estacionales en el suministro de energía solar de forma que, las temperaturas más altas de todo el ciclo anual se registran durante los meses de julio y agosto, con un cierto retraso sobre el máximo de intensidad de la radiación solar, que se produce en el mes de junio. La elevación de la temperatura de la atmósfera y de la superficie terrestre responde al efecto acumulado del total de energía recibida, lo que ocasiona este retraso temporal en los valores máximos de la temperatura ambiente respecto a los de la insolación.

Los comentarios realizados para la variación anual de la temperatura ambiente en la zona del embalse de Entrepeñas son válidos para el resto de los embalses. Existen diferencias en los valores de las temperaturas que presentan cambios en función de la zona considerada. Las temperaturas máximas anuales en las zonas de los embalses de Sobrón, Arrocampo, coincide con la de Torrejón-Tajo, y Cortes II son de 27,44, 31,11 y 29,2 °C, respectivamente. Las temperaturas mínimas anuales en las zonas de los embalses de Sobrón, Arrocampo, coincide con la de Torrejón-Tajo, y Cortes II son -4.8, 0.30 y 0.7 °C, respectivamente.

3.3. Presión atmosférica

En todas las zonas objeto de estudio, los cambios estacionales de la presión atmosférica han presentado variaciones poco importantes a lo largo de un ciclo anual. Por ejemplo, en la figura 2.18 se muestra la variación anual de esta propie-

dad en la zona del embalse de Entrepeñas. Los valores de las presiones máxima y mínima se han movido en un intervalo de 0,93 – 0,96 bares, con una diferencia media entre los valores máximo y mínimo diario de 0,0040 bares.

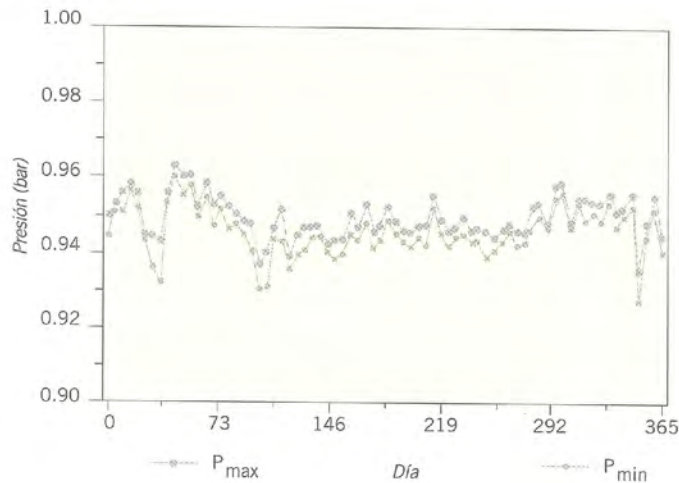


Figura 2.18. Variación estacional de las presiones máxima y mínima diaria en el embalse de Entrepeñas.

La energía impartida por el viento sobre la superficie del agua es función de la relación entre las densidades del aire y del agua. Las variaciones temporales de la temperatura y la presión atmosférica producen los cambios de la densidad del aire que para la zona del embalse de Entrepeñas se recogen en la figura 2.19.

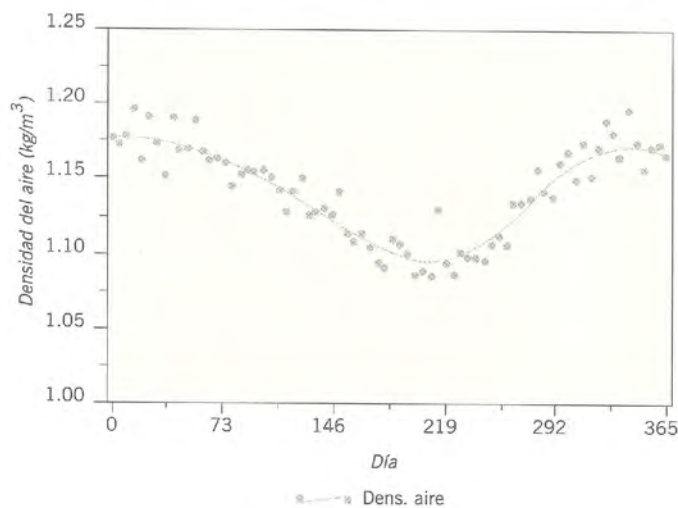


Figura 2.19. Variación estacional de la densidad del aire en el embalse de Entrepeñas.

Dada la escasa importancia de la variación anual de la presión del aire, el factor determinante en la evolución anual en la densidad del aire son los cambios de la temperatura.

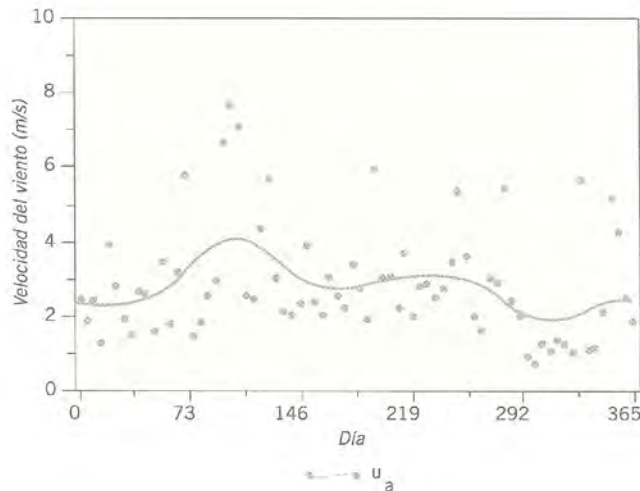
El análisis realizado para la zona del embalse de Entrepeñas es válido para el resto de zonas objeto de estudio.

3.4. Velocidad del viento

La difusividad en la capa superficial del agua de los embalses varía de forma proporcional al cubo de la velocidad del viento que impulsa el proceso de mezcla.

La figura 2.20 muestra la variación estacional de la velocidad del viento, calculada como velocidad media a partir de los registrados en la central nuclear de Trillo durante periodos de 24 h. La mayor parte de los valores de la velocidad del viento (82,2%), medidos a largo del ciclo anual correspondiente a 1998 han estado comprendidos entre 1 y 4 m s⁻¹, mientras sólo un 12,3 % de los valores han estado comprendidos entre 6 y 8 m/s.

Figura 2.20.
Variación anual
de la velocidad
del viento
en el embalse
de Entrepeñas.



En el embalse de Sobrón, solamente en cuatro días del año se han medido velocidades del viento superiores a 4 m s⁻¹, la mayor parte de los valores de la velocidad del viento han estado comprendidos entre 1 y 4 m s⁻¹. La velocidad del viento medida en los embalses de Arrocampo y Torrejón-Tajo presenta fuertes variaciones a lo largo de todo el año. Los valores de velocidad oscilan entre 1 y 6,3 m s⁻¹. En el embalse de Cortes II, la velocidad del viento en los primeros meses del año alcanzó valores de hasta 7,5 m s⁻¹. A medida que avanzaba el ciclo anual los valores de velocidad medidos disminuyeron, oscilando entre 5 y 1 m s⁻¹.

Campañas de campo

Este apartado contiene una descripción general de la experimentación llevada a cabo en los sistemas hidrológicos estudiados. Así mismo, se recogen y analizan los resultados de las medidas realizadas. En primer lugar se da una descripción de la metodología seguida en la realización de las campañas de campo.

1. METODOLOGÍA

Las diferencias en la metodología y objetivos de las campañas, según se realicen en ríos o embalses, han mostrado la conveniencia de hacer un tratamiento separado de ambos tipos.

1.1. Campañas en ríos

El conjunto de campañas experimentales realizadas en los ríos Tajo y Ebro han tenido como objeto determinar la dinámica dispersante y diluyente del curso de agua, para lo que se ha utilizado la técnica de trazadores.

Estos estudios están basados en la hipótesis de que el trazador se comporta de igual forma que las propias moléculas de agua, de modo que conocido el movimiento del trazador puede establecerse el comportamiento del medio hídrico. Los resultados proporcionados por este tipo de experimentos con trazadores pueden ser utilizados para pronosticar la posible evolución de un vertido de sustancias solubles en agua, conservativas o no, pero deben usarse con precaución cuando se trate de vertidos insolubles o inmiscibles con agua.

Los experimentos de trazador en los tramos de río han consistido en la inyección de una cierta cantidad de colorante en un punto de la corriente y en el estudio de la evolución de la mancha resultante en puntos de muestreo predeterminados, situados aguas abajo de la estación de inyección. El paso de la mancha por cada uno de estos puntos es recogido en forma de una distribución concentración-tiempo. El análisis estadístico de estas curvas permite determinar las características más significativas de la corriente, tales como el caudal, la velocidad media o su capacidad dispersante y diluyente.

La inyección ideal de trazador ha de efectuarse de forma instantánea, pero como esta operación es compleja desde el punto de vista técnico, en todos los experimentos realizados se ha garantizado que el tiempo de inyección fuera despreciable respecto al tiempo de desarrollo total de la campaña.

1.1.1. Métodos de medida y análisis instrumental

La realización de las campañas experimentales en río ha implicado la medida de las siguientes variables:

- La concentración de colorante en las muestras de agua tomadas en las diferentes estaciones de muestreo. La concentración de trazador se ha determinado mediante fluorimetría con una precisión de $0,01 \text{ mg m}^{-3}$. Esta labor se desarrolló fundamentalmente en los laboratorios del Cedex y en los días que siguieron a la campaña, para garantizar que las muestras no experimentaran posibles deterioros o contaminaciones.
- La anchura del cauce sumergido, que se ha determinado mediante un medidor láser provisto de teleobjetivo. Este equipo proporciona medidas de distancia con una precisión de 10 cm. Este parámetro resulta de interés para la estimación de los coeficientes de dispersión longitudinal mediante diversas correlaciones empíricas.
- La posición de las estaciones de inyección y toma de muestras. La localización exacta de estas estaciones se ha realizado mediante el uso de un sistema de posicionamiento vía satélite (GPS). La precisión de estos equipos es de unos 15 m.
- La longitud del tramo estudiado se ha determinado a partir de la posición de los puntos de medida mediante el uso de planos detallados de la zona.

1.1.2. Planificación de las campañas

La planificación de las campañas experimentales de trazador realizadas en ríos ha incluido los siguientes aspectos:

a) Recopilación de datos sobre las características generales del tramo

Este compendio de datos incluye la geometría del canal, el régimen de caudales, la pendiente del cauce del río, las zonas de estancamiento, los avenamientos, etc. Esta tarea previa se ha desarrollado, según se ha comentado en el apartado de Documentación, a partir de mapas detallados de la zona a escala 1:50000, mediante visitas a organismos públicos con competencias sobre el medio hídrico como ministerios o confederaciones hidrográficas e información suministrada por las empresas explotadoras de los sistemas hidrológicos.

En la realización de las campañas se ha pretendido realizar el estudio en unas condiciones de flujo que cubran el régimen normal de caudales de los ríos estudiados. Con el fin de seleccionar la fecha de realización de las campañas, desde que comenzó el desarrollo del proyecto, se realizó un seguimiento de la evolución del caudal de los ríos Tajo y Ebro. El seguimiento se ha realizado mediante consulta del Boletín Hidrológico, que edita el Ministerio de Medio Ambiente.

b) Reconocimiento del tramo en estudio

La realización de este trabajo de campo comprende la inspección de ambas

márgenes del río a fin de localizar la posición de las colas de los embalses construidos en el tramo, así como el emplazamiento idóneo para los puntos de inyección y de toma de muestras.

c) Planificación del seguimiento de la mancha de trazador

El dato fundamental para realizar un plan de trabajo ajustado a cada campaña es el estado de flujo del río, esto es, el caudal circulante. Conocidas las condiciones aproximadas de flujo, el procedimiento operativo seguido para cada planificación experimental ha sido el siguiente:

- Seleccionar, dentro del conjunto de aforos mecánicos disponibles de las estaciones de Trillo, Miranda de Ebro y Tortosa, aquellos que definen un intervalo de caudales en el que puedan enmarcarse los valores medidos los días anteriores a la campaña.
- Calcular la velocidad media de la corriente, como relación entre el caudal circulante y el área transversal de flujo.
- Estimar el coeficiente de dispersión de la corriente mediante el método analítico de Fischer, apartado 4.
- Calcular el tiempo medio y la desviación típica de la curva para cada estación de toma de muestras, mediante las expresiones correspondientes a una distribución gaussiana, apartado 4.
- Predecir el tiempo total de paso de la mancha de trazador, que aproximadamente presenta un valor de 3 desviaciones típicas, centrado en un tiempo igual al tiempo medio de la curva.
- Estimar la llegada del primer frente del trazador. El tiempo de inicio del paso del trazador puede calcularse como el tiempo medio menos 1,5 veces la desviación típica estimada.

Esta metodología de pronóstico, aunque bien fundamentada desde el punto de vista teórico, ha demostrado que ha de ser utilizada con cautela, principalmente por dos razones:

- Los ríos, como otros muchos sistemas de la naturaleza, resultan muy heterogéneos y variables desde el punto de vista dinámico. En este sentido, resulta complejo obtener una caracterización adecuada de un tramo de río a partir del aforo realizado en un punto concreto de su curso.
- Las curvas recogidas para describir el paso de la mancha de trazador por las diversas estaciones de muestreo no han de responder necesariamente al comportamiento gaussiano previsto en el análisis de Taylor, apartado 4.

Estas dificultades son responsables de que las predicciones realizadas sobre el movimiento de la mancha estén sujetas a un cierto grado de incertidumbre.

La elevada sensibilidad de los equipos de medida utilizados ha permitido trabajar con concentraciones de trazador muy bajas. Utilizar concentraciones pequeñas es beneficioso desde el punto de vista ambiental y posibilita rebajar los costes, pero también tiene ciertos inconvenientes como que la mancha sólo resulta perceptible a simple vista en las primeras estaciones de muestreo y cuando la concentración de trazador es alta, pero no en el frente ni en la cola. Esta dificultad, añadida a las incertidumbres asociadas al pronóstico de la evolución del trazador, ha obligado a trabajar con un margen de seguridad de 0,5 desviaciones típicas respecto al inicio del tiempo de toma de muestras. La toma de muestras para la caracterización de la cola de la mancha no se ve afectada por esta contingencia, puesto que el fin de paso de la nube se verifica mediante el uso de un fluorímetro.

El intervalo de muestreo se ha fijado de forma que la distribución de trazador quedara definida por un número suficiente de puntos, al menos 50. Con este criterio, y estimando un tiempo de paso igual a tres veces la desviación típica, el intervalo de muestreo puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$\Delta t_c = \frac{3\sigma_t}{50} \quad [3.1]$$

Los intervalos de tiempo utilizados en las campañas experimentales realizadas han variado entre 1 y 15 minutos en función de la velocidad de la corriente y de la distancia entre la estación de inyección y cada punto de muestreo.

d) Elección del trazador

La aptitud de un trazador para su uso en experimentos hidrológicos está sujeta al cumplimiento de un conjunto de características que lo aproximen al concepto de trazador ideal. Entre las propiedades más importantes de los trazadores ideales se encuentran las siguientes:

- *Fidelidad de marcado.* El trazador disuelto en agua ha de seguir el mismo curso de ésta, sin que se produzcan precipitaciones que puedan separarlo, fijaciones en los materiales del cauce o alteraciones químicas o físicas que interfieran en su medida u ocasionen una disminución de la concentración.
- *Detectabilidad.* La determinación cuantitativa a concentraciones bajas ha de ser posible de forma sencilla y con exactitud suficiente.
- *Solubilidad.* El trazador ha de ser suficientemente soluble en agua para permitir la preparación de soluciones suficientemente concentradas que posibiliten el marcado de elevados volúmenes de agua.

- *Baja toxicidad química.* La toxicidad química de los trazadores empleados en hidrología ha de ser la menor posible de forma que se minimice el impacto ambiental ocasionado por los experimentos.
- *Coste.* El precio de los trazadores actuales es bastante elevado por lo que el gasto ocasionado en este concepto puede constituirse en una parte importante del presupuesto total del experimento.

Los trazadores químicos más tradicionales han sido el cloruro sódico y el dicromato de potasio, sin embargo, el alejamiento de la idoneidad que ambos evidencian, ha mostrado la conveniencia de suspender su uso en favor de los trazadores fluorescentes como la uranina, la piranina, la eosina o la rodamina, que no resultan tóxicas y pueden ser detectados en concentraciones extremadamente bajas. Sin embargo, los estudios experimentales han demostrado que las propiedades de las tinciones fluorescentes pueden verse afectadas por factores tales como el pH, la luz solar, los disolventes usados, la temperatura o las características oxidantes del medio. En la actualidad los dos trazadores que mejores propiedades ofrecen son la rodamina B y la rodamina WT, por lo que han sido ambos trazadores los utilizados en el desarrollo del presente proyecto.

e) Necesidades de trazador

La cantidad de trazador que se necesita para la adecuada caracterización de un tramo de río es función de la longitud del tramo, del caudal circulante y de la capacidad dispersante de la corriente. Esta masa de trazador puede evaluarse previo establecimiento de una concentración media deseable para la curva de paso mediante la siguiente expresión:

$$M_0 = Qt_t C_{med} \quad [3.2]$$

Donde Q es el caudal del río, C_{med} es la concentración media de la curva de trazador y t_t es el tiempo de tránsito, cuyo valor aproximado es de tres desviaciones típicas. Los efectos de la dispersión, que el trazador experimenta a lo largo del tramo en estudio, ocasionan que la concentración media sea menor a medida que la estación de muestreo se encuentra más alejada del punto de inyección, por lo que el cálculo ha de basarse en el valor de concentración media deseado para el último punto de muestreo.

El cálculo de la cantidad necesaria de trazador también puede basarse en el valor de la concentración máxima de la curva de trazador en un determinado punto de muestreo. La ecuación empírica utilizada con este fin presentan la siguiente forma genérica:

$$V_t = k \left(\frac{Q_{max} L}{u_m} \right)^v C_{max} \quad [3.3]$$

Donde V_t es el volumen de trazador en litros, Q_{max} es el caudal máximo en el tramo en $m^3 s^{-1}$, L es la distancia entre los puntos de inyección y toma de muestras, u_m es la velocidad media de la corriente en $m s^{-1}$ y C_{max} es la concentración máxima deseada en $mg l^{-1}$. La constante k y el exponente e dependen de las características del trazador y han de ser determinadas experimentalmente. Para el caso de la rodamina, la ecuación 3.3 toma la forma de la ecuación [3.4].

$$V_t = 2 \times 10^{-3} \left(\frac{Q_{max} L}{u_m} \right)^{0,93} C_{max} \quad [3.4]$$

f) Personal y equipamiento

Las necesidades de personal para una campaña experimental se han establecido en función del pronóstico del paso de la mancha por cada una de las estaciones de muestreo de acuerdo con los siguientes criterios.

- Cada punto de muestreo ha necesitado un mínimo de tres operarios para realizar las funciones de cronometraje, etiquetado y toma de muestras.
- Siempre que sea posible, y con el fin de minimizar las necesidades de personal, pueden trasladarse los equipos de muestreo entre estaciones en las que el paso de la mancha no solape temporalmente.

Incluyendo las tareas de coordinación y el manejo del fluorímetro, fue necesario un equipo de 12 personas. El equipo se constituyó, por un técnico superior del Cedex, dos profesores y tres becarios de la UCM, cinco estudiantes de 5º curso de la titulación de Ingeniería Química y dos Ingenieros Químicos contratados por la UCM como colaboradores para la realización de las campañas. Dada la naturaleza de la experimentación realizada, se dotó al personal participante de identificación adecuada y de copias de los correspondientes permisos de las confederaciones hidrográficas correspondientes.

El equipamiento básico para la realización de cada una de las campañas experimentales ha incluido:

- Planos de la zona de escala 1:50.000.
- Cuatro vehículos.
- Un fluorímetro portátil marca TURNER DESIGNS, modelo 10-AU, con una sensibilidad de $0,01 mg m^{-3}$ para la rodamina.
- Un sistema de posicionamiento vía satélite (GPS) marca GARMIN, modelo 38.
- Un podómetro marca DIGI-WALKER modelo SW-50.
- Un medidor de distancias láser marca LEIKA, modelo Disto-Basic, dotado de teleobjetivo.
- Cronómetros.

- Material de laboratorio diverso y para la toma de muestras.
- Dos tomamuestras automáticos

g) *Autorizaciones y comunicación social*

La realización de cada uno de los experimentos necesitó de la preceptiva autorización de las confederaciones hidrográficas del Tajo y del Ebro encargadas de la administración del medio hídrico estudiado. Asimismo, y con el fin de evitar la posible alarma social que un experimento de esta naturaleza puede generar, el conjunto de campañas experimentales a realizar se puso en conocimiento de los ayuntamientos de las localidades ubicadas en las proximidades del río, de las centrales nucleares de Trillo, Santa María de Garoña y Ascó, del Seprona (Servicio para la Protección de la Naturaleza) y de la Agencia Catalana del Agua.

1.2. Campañas en embalses

Todos los lagos y embalses presentan, en mayor o menor medida, una variación regular de la temperatura del agua. Estos cambios son la respuesta a los ciclos climáticos estacionales, cuyo factor controlante primario, a una latitud dada, son las variaciones cíclicas de la radiación solar. Los lagos y embalses situados en el cinturón ecuatorial permanecen cálidos todo el año y presentan ciclos térmicos de baja amplitud. Desde el ecuador hacia los polos, la temperatura media anual de los lagos decrece y aumenta la amplitud de los ciclos térmicos, en consonancia con los ciclos de insolación. Los embalses presentan, asimismo, variaciones diarias de la temperatura del agua que resultan de las diferencias de insolación entre el día y la noche y de las condiciones atmosféricas locales, como los vientos o la cubierta de nubes. Todo este conjunto de circunstancias tienen su efecto en la densidad del agua del embalse y, por tanto, en su estabilidad o resistencia al mezclado vertical por efecto de la acción del viento, Lerman et al., 1995.

La clasificación más utilizada para los ciclos térmicos de lagos y embalses fue establecida por Hutchinson y Löffler, 1956, y Hutchinson, 1957. Esta clasificación contempla una gran variedad de comportamientos térmicos y dinámicos, sin embargo, aquí nos centraremos en exclusiva a los denominados *lagos cálidos monomíticos*, cuya dinámica se ajusta a la de algunos de los embalses estudiados en el presente proyecto. Estos lagos no presentan, en ningún momento, temperaturas inferiores a los 4 °C, circulan libremente en invierno y se estratifican en verano.

El ciclo térmico anual da comienzo durante la estación fría en la que las aguas del embalse alcanzan un estado de homogeneidad caracterizado por un perfil térmico vertical uniforme. La llegada de estaciones más templadas está marcada por un aumento de la radiación solar recibida por las aguas. La energía incidente calienta las aguas superficiales, hace disminuir su densidad e

impulsa el desarrollo de un grado creciente de estratificación térmica. Inicialmente, la energía térmica depositada sobre las aguas superficiales se transfiere en profundidad por la acción del viento, que es más efectiva cuanto más próxima está la temperatura del agua a 0 °C, dada la poca estabilidad que proporcionan los gradientes térmicos a estas temperaturas. A medida que la calefacción solar se intensifica, las aguas superficiales se calientan y alcanzan temperaturas en las que los efectos de flotabilidad resisten la acción mezcladora ejercida por el viento. La acción continuada del viento, combinada con el calentamiento superficial, provoca el desarrollo de una capa superficial isoterma de escasa profundidad, llamada epilimnion. Por debajo de esta lámina de agua, se sitúa una zona en la que el gradiente térmico y, por tanto, la estabilidad hidrostática son notablemente mayores. Esta capa se denomina metalimnion y separa la epilimnion de las aguas profundas y frías que constituyen la hipolimnion. El plano que marca el máximo gradiente de temperatura se denomina termoclina.

La profundidad a la que se localiza la metalimnion varía a lo largo del ciclo anual. En un principio, la metalimnion está poco profunda, a unos 2 o 3 m de la superficie, pero la transferencia continuada de calor durante la estación cálida y la acción mezcladora del viento tienen como efecto la profundización y el aumento del tránsito térmico en la termoclina, cuya estructura se hace progresivamente más estable. El calentamiento continuado, en combinación con vientos suaves, puede provocar el desarrollo de termoclinas superficiales, de modo que no es infrecuente la coexistencia de varias termoclinas en estas condiciones climatológicas. La estabilidad de estas metalimnion múltiples, normalmente, no es tan elevada como la de la primaria y pueden ser destruidas por periodos de frío o mezcla intensa.

La estabilización de la capa superficial, que recibe la radiación solar, acaba provocando el desarrollo de una termoclina única que persiste durante todo el verano y principios del otoño. En adelante, el calentamiento de la epilimnion continúa, con pérdidas menores debidas a la evaporación y transferencia de calor sensible. Una vez que la estratificación está completamente desarrollada, la hipolimnion sólo aumenta ligeramente su temperatura hasta el mezclado completo.

A finales del verano, las pérdidas, fundamentalmente de calor sensible y latente, exceden los aportes de energía en forma de calor radiante y el embalse empieza a enfriarse. Dado que el enfriamiento se produce en la superficie, las aguas superficiales más frías y densas descienden y la epilimnion experimenta un proceso de mezcla convectiva. A medida que la temperatura de la epilimnion decrece, la estabilidad térmica de la columna de agua del embalse disminuye y la termoclina comienza a descender. En otoño, la temperatura de la epilimnion se aproxima a la de la hipolimnion.

limnion y en el embalse da comienzo un proceso de mezclado que, favorecido por el viento, hace que las aguas alcancen un estado de homogeneidad. A partir de este momento, el enfriamiento superficial continua debido a la evaporación y a la transferencia de calor sensible a la atmósfera, lo que hace que el embalse presente diferentes estados homogéneos caracterizados por temperaturas cada vez más bajas, hasta que el aumento de la radiación solar inicia un nuevo ciclo. El proceso de transferencia de calor sensible está, en gran medida, favorecido por la condición de inestabilidad que representa el aire frío sobre un agua relativamente templada, lo que ocasiona notables efectos de convección en la capa límite atmosférica.

Los principales factores controlantes de la formación, estabilidad y extensión de la estratificación térmica son la densidad del agua, la radiación solar, la transferencia de energía a través de la interfaz aire-agua, la morfometría del embalse y el mezclado provocado por la advección y fenómenos inducidos por el viento.

En un embalse estratificado los movimientos verticales, circulaciones a gran escala y turbulencia, están restringidos y el fluido sólo puede desplazarse o mezclarse verticalmente hasta zonas en que la entrada de energía cinética superficial pueda superar las disipaciones internas y la energía potencial asociada a la estratificación. Cuando la estratificación térmica de un embalse es poco acusada, la energía cinética impartida por el viento es suficiente para provocar mezcla vertical, pero a medida que la columna de agua se calienta los requerimientos energéticos para la mezcla son mayores. Sobrepasado un cierto estado de estratificación, la estructura de densidades se hace lo bastante estable como para que las aguas profundas no se vean afectadas por los efectos de mezcla inducidos en la superficie. Cuatro generalizaciones pueden realizarse a cerca de la estratificación de embalses dominada por factores meteorológicos (embalses con altos tiempos de residencia):

- Los principales factores causantes de la estratificación actúan en la interfaz aire-agua, por lo que las variaciones horizontales en el estado de estratificación se ven minimizadas.
- No hay diferencias significativas en el estado de estratificación alcanzado en diferentes años, sino que el ciclo se repite de año en año con pautas temporales similares. Las temperaturas de la hipolimnion se mueven dentro de intervalos estrechos de 1 - 2 °C.
- Cuanto mayor es la superficie del embalse, mayor es la energía cinética impartida por el viento, lo que conduce a periodos de homogeneidad más largos y a temperaturas más altas en la hipolimnion.
- Cuanto más profundo es el embalse, menor es la energía cinética por unidad de volumen disponible para la mezcla, lo que conduce a estados estratificados más intensos.

Los embalses de profundidad media igual o inferior a 5 m, a menudo, no presentan estratificación térmica persistente debido a que ésta es suprimida por el calentamiento solar de toda la columna de agua y por la mezcla impulsada por el viento, con resultado de condiciones isotermas. La estratificación y los contrastes verticales de temperatura en lagos poco profundos siguen, frecuentemente, las variaciones diarias del viento y de la radiación solar. Efectos similares pueden apreciarse en embalses cuyo aporte medio anual supera al menos en diez veces el volumen del embalse. Un criterio más científico para evaluar la estratificación fue propuesto por Norton, *Norton, 1968*, mediante el número densimétrico de Froude, definido por la siguiente expresión:

$$F_D = \frac{LQ}{HV} (g\xi)^{-1/2} = \frac{LQ}{HV} \frac{1}{N} \quad [3.5]$$

donde L , H y V son la longitud, profundidad media y volumen del embalse, Q es el aporte medio, g es la aceleración de la gravedad, ξ es el gradiente vertical medio de densidades y N es la frecuencia de estabilidad o frecuencia de Brunt-Väisälä, que responde a la siguiente expresión:

$$N^2 = -\left(\frac{\partial\rho}{\partial z}\right) \frac{g}{\rho} \quad [3.6]$$

donde ρ es la densidad del agua, g es la aceleración de la gravedad y z es la profundidad.

Si F_D es menor de $1/\pi$ es esperable un cierto grado de estratificación y, por tanto, de extracción selectiva en la descarga del embalse.

Los estados estratificados pueden presentar variaciones horizontales como consecuencia del calentamiento diferencial, la entrada de corrientes o la descarga de agua.

La entrada y salida de agua de un embalse puede proporcionar cantidades significativas tanto de energía cinética (advección) como de energía potencial (calor) y, por tanto, modificar los esquemas de estratificación previamente descritos. La mayoría de los aportes de agua al embalse se producen por unas pocas corrientes, cuya acción se localiza en puntos concretos del embalse. Las energías cinética y potencial impartidas por la entrada de corrientes de agua es más difícil de predecir que la procedente de la acción del viento (más o menos uniforme a lo largo del año) o de la radiación solar (variación sinusoidal). Estas entradas son las únicas capaces de introducir energía cinética y potencial en la hipolimnion vía corrientes de densidad, que favorecen el mezclado y causan un aumento de temperatura de la hipolimnion durante el verano. La descarga del agua contenida en embalses tienen como efecto la

conversión de su energía potencial en energía cinética y en mezcla. El efecto de mezcla de la descarga de agua depende del estado de estratificación del embalse y de la situación de la toma de agua. Los casos extremos son la extracción de forma radial desde todas las direcciones hacia la salida y las aspiraciones restringidas a capas horizontales de pocos metros de espesor, extendidas a toda la longitud del embalse.

La experimentación realizada en embalses ha tenido como objetivo realizar un seguimiento de la estructura térmica y conductivimétrica de la lámina de agua contenida en los embalses objeto de estudio en relación con sus ciclos térmicos anuales. La medida de los perfiles de temperatura y conductividad permite poner de manifiesto la estructura de densidades y la estabilidad de la columna de agua frente a los procesos de mezcla inducidos por agentes externos. Estos estudios se han completado con medidas de la transparencia de las aguas, determinada a partir de la profundidad de Secchi y del espesor de la lámina de agua.

1.2.1. Métodos de medida y análisis instrumental

La realización de las campañas experimentales en embalses ha implicado la medición de las siguientes variables:

- El perfil vertical de *conductividad eléctrica* en cada uno de los puntos de control utilizados, de modo que quedara registrado el espesor completo de la lámina de agua. La conductividad se ha medido mediante un termoconductivímetro portátil con una precisión de $1 \mu\text{S cm}^{-1}$. La conductividad de una solución salina varía con la temperatura, por lo que los valores proporcionados por el equipo estaban referidos a una temperatura de $20 \text{ }^\circ\text{C}$. La constante programada para la corrección de los efectos de la temperatura sobre la conductividad eléctrica fue de un $2 \text{ } \% \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$, de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.
- El perfil vertical de *temperatura* en cada uno de los puntos de control utilizados, de modo que quedara registrado el espesor completo de la lámina de agua. La temperatura se ha medido mediante un termoconductivímetro portátil con una precisión de $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$.
- La *profundidad* en cada uno de los puntos de control utilizados, mediante un equipo de sonar con una precisión de $0,1 \text{ m}$.
- La *profundidad de Secchi* en cada uno de los puntos de control utilizados, mediante un disco de Secchi, con una precisión de $0,1 \text{ m}$.
- La posición de los puntos de medida mediante el uso de un sistema de posicionamiento vía satélite (GPS). La precisión de estos equipos es de unos 15 m .

1.2.2. Planificación de las Campañas

La planificación de las campañas experimentales realizadas en los embalses ha abarcado los siguientes aspectos:

a) Recopilación de datos sobre las características generales de los embalses

Esta actividad está destinada a la adquisición de los primeros datos necesarios para la ejecución y el análisis de los trabajos de campo tales como batimetrías, curvas características de embalses, estados de llenado, etc. Los puntos de medida para las campañas pueden identificarse con la ayuda de mapas de la zona a escala 1:25.000 y 1:50.000, junto al reconocimiento *in situ* de las márgenes del embalse y de la información recogida en la tarea de Documentación. Se trata de hacer una recopilación de todos aquellos puntos desde los que puede controlarse la lámina de agua en todo su espesor y en los que se puede presentar algún tipo de perturbación del comportamiento dinámico del embalse, debido a factores externos como, por ejemplo, avenamiento de arroyos, detracciones de agua, aportaciones industriales o ganaderas, operación de centrales eléctricas e infraestructuras construidas en el sistema hidrológico. En el caso de algunos embalses proporcionan, asimismo, la información necesaria para la elección de puntos de botadura de las embarcaciones utilizadas en la realización de las campañas.

b) Seguimiento del ciclo térmico de embalses

El control de la evolución del ciclo térmico anual de embalses, que acompaña al cambio estacional de las condiciones meteorológicas, se ha realizado de forma periódica y siempre con el objetivo de definir los estados extremos de estratificación y los cambios más significativos experimentados por la masa de agua.

c) Personal y equipamiento

La diversificación de actividades a realizar en las campañas: control de la embarcación, manejo de los sistemas de navegación por satélite y sonar, medición de perfiles de temperatura y conductividad y profundidad de Secchi, etc., obliga a contar, al menos con tres operarios. En cuanto al equipamiento, las necesidades fundamentales han sido:

- Planos de la zona de escala 1:50.000
- Un vehículo.
- Una embarcación motopropulsada. En los embalses de Entrepeñas, Bolarque, Zorita Hidráulica, Almoguera y Estremera, la embarcación fue alquilada. En el resto de embalses, las embarcaciones, así como sus pilotos, fueron proporcionados por las empresas explotadoras de las centrales nucleares o centrales hidroeléctricas instaladas en el embalse.

- Un termoconductivímetro portátil marca CRISON con sensibilidades de $1 \mu\text{S cm}^{-1}$ para la conductividad y $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$ para la temperatura, dotado de un cable de 100 m de longitud. El equipo fue calibrado en el laboratorio antes de realizar cada una de las campañas experimentales con un patrón estándar marca CRISON de KCl 0.010 M ($1278 \mu\text{S cm}^{-1}$ a $20 \text{ }^\circ\text{C}$).
- Un sistema de posicionamiento vía satélite (GPS) marca GARMIN, modelo 38.
- Un equipo de sonar marca EAGLE, modelo Ultra Classic, con una precisión de 0,1 m para la profundidad.
- Un disco de medida de la profundidad de Secchi.

d) Autorizaciones

La realización de las campañas en los embalses instalados en el río Tajo necesitó de la preceptiva autorización de la Confederación Hidrográfica del Tajo. En el caso del embalse de Torrejón-Tajo, debido a su ubicación en el Parque Natural de Monfragüe, la utilización de embarcaciones exigió autorizaciones especiales y la puesta en conocimiento del director del Parque del desarrollo de cada una de las campañas. En todos los embalses se solicitó autorización a las empresas explotadoras del mismo.

2. DESCRIPCIÓN DE LAS CAMPAÑAS

En este apartado se describe la realización de las campañas de campo y se analizan los resultados obtenidos. Por las mismas razones expuestas en el apartado 1 (Metodología), el apartado se estructura en dos partes en las que se tratan por separado las campañas realizadas en ríos y en embalses.

2.1. Resultados de campañas de campo en ríos

En total se han realizado siete campañas en tramos en los que el agua circula con las características de un río. Tres en el tramo de influencia de la central nuclear de Trillo y dos en cada uno de los tramos de influencia de las centrales nucleares Santa María de Garoña y de Ascó.

Independientemente del tramo de río considerado, existen una serie de tareas que son comunes a cualquiera de las campañas y que a continuación se describen. El trabajo de campo abarca fundamentalmente dos actividades: la inyección del trazador y la toma de muestras. Posteriormente, en el laboratorio, se realiza el análisis de las muestras recogidas.

Dadas las diferentes características de los tramos objeto de estudio, la forma en que se realizó la inyección en cada tramo presenta ciertas diferencias, por lo que se describirá por separado para cada tramo.

La toma de muestras se realizó desde la orilla del río con ayuda de cañas telescópicas de 7 m de longitud, en cuyo extremo se dispusieron recipientes de 250 ml, a profundidad comprendida entre 10 y 20 cm, fotografía 3.1. Los puntos exactos de muestreo, dentro de cada sección transversal, se eligieron, siempre que fuera posible de forma que estuvieran alejados de la orilla y con suficiente circulación de agua. Previamente a la inyección de trazador, se tomaron muestras de agua del río en el punto de inyección y en cada una de los puntos de muestreo. En alguno de los puntos de muestreo y para recoger la cola de la mancha de trazador se empleó un tomamuestras automático.

Las muestras se identificaron con una etiqueta que contenía la siguiente información:

- Fecha de la campaña.
- Número de la estación de toma de muestras.
- Posición del punto de toma en la sección transversal: centro u orilla.
- Número de la muestra.
- Tiempo transcurrido desde la inyección.



Fotografía 3.1.
Toma de muestras manual.

El volumen de agua de cada muestra, 50 ml, se eligió como solución de compromiso para poder realizar medidas directas en el fluorímetro sin necesidad de diluir y tratando de minimizar el espacio requerido para su transporte y almacenamiento en el laboratorio.

El final del paso de la nube de trazador por cada punto de muestreo se comprobó por medición *in situ* con un fluorímetro para asegurar el paso de la mancha completa durante el periodo de muestreo.

El análisis de las muestras comprende tanto el seguimiento de la mancha de trazador realizado en el campo como los análisis realizados en el laboratorio sobre las muestras tomadas en la campaña. Llegados a este punto hay que hacer notar que se tomaron muestras distintas, aunque a tiempos idénticos, para el análisis definitivo y para las comprobaciones *in situ*, con el objeto de evitar una posible contaminación de las muestras. Esta actividad involucra dos tareas:

- *Preparación de los patrones.* Los patrones se han preparado con el mismo trazador y del mismo lote que el utilizado en la campaña experimental y con agua del río, que se recogió antes del comienzo de los experimentos. La concentración de los patrones ha estado siempre comprendida en el rango

de linealidad de la técnica experimental que, para la rodamina y el fluorímetro utilizado, se encuentran entre 0 y 500 mg m⁻³.

- *Medición de las muestras.* La medición de las muestras se ha realizado una vez estabilizado el equipo y con control de la temperatura ambiente. El fondo utilizado en los análisis ha sido el agua del río recogida para la elaboración de los patrones.

2.1.1. Tramo de influencia de la central nuclear Santa María de Garoña

Según se ha descrito en el capítulo Documentación, la central nuclear Santa María de Garoña vierte en el embalse de Sobrón. El agua que abandona este embalse es el principal aporte del embalse de Puentelarrá. Aguas abajo de la presa de Puentelarrá, el sistema hidrológico es un tramo de río en el que la circulación de agua se ve interrumpida o ralentizada por la presencia de pequeñas presas o azudes. De entre estos diques y azudes cabe destacar, por su capacidad de embalsamiento, el dique de la central hidroeléctrica de Cabriana. El tiempo de retención del embalse (en términos de realización de la campaña), junto a la gran capacidad diluyente de la masa de agua contenida en el mismo, aconsejaron la partición del tramo a favor de un mejor desarrollo y seguimiento de la campaña. Por tanto se realizaron dos inyecciones diferentes de trazador. Los dos puntos de inyección coincidieron con la descarga de las centrales hidroeléctricas de Puentelarrá y de Cabriana.

En las inyecciones realizadas en la salida de turbinas de la central hidroeléctrica de Puentelarrá, se inyectaron 4.000 y 8.000 g de rodamina B disuelta en ácido acético y agua, en cada una de las campañas. Esta inyección se realizó desde el final del muro de contención de la bocana de la salida de turbinas de la central hidroeléctrica de Puentelarrá, fotografía 3.2.

Fotografía 3.2.
Mancha de trazador en la inyección realizada a la salida de turbinas de la central hidroeléctrica de Puentelarrá.



El seguimiento de la evolución de la mancha se realizó en dos estaciones de muestreo. Las coordenadas de cada una de ellas y la distancia al punto de inyección se muestran en la tabla 3.1 y su situación se indica en el plano de la figura 3.1.

Estación	Coordenadas	Distancia P. inyección (m)	Margen del río	Localidad
1	04-9938/47-3018	2.292	Izquierda	Fontecha
2	04-9951/47-3017	9.059	Derecha	Souzana

Tabla 3.1. Situación de las estaciones de muestreo en el tramo del río Ebro comprendido entre la presa de Fuentelarrá y la central hidroeléctrica de Cabriana.

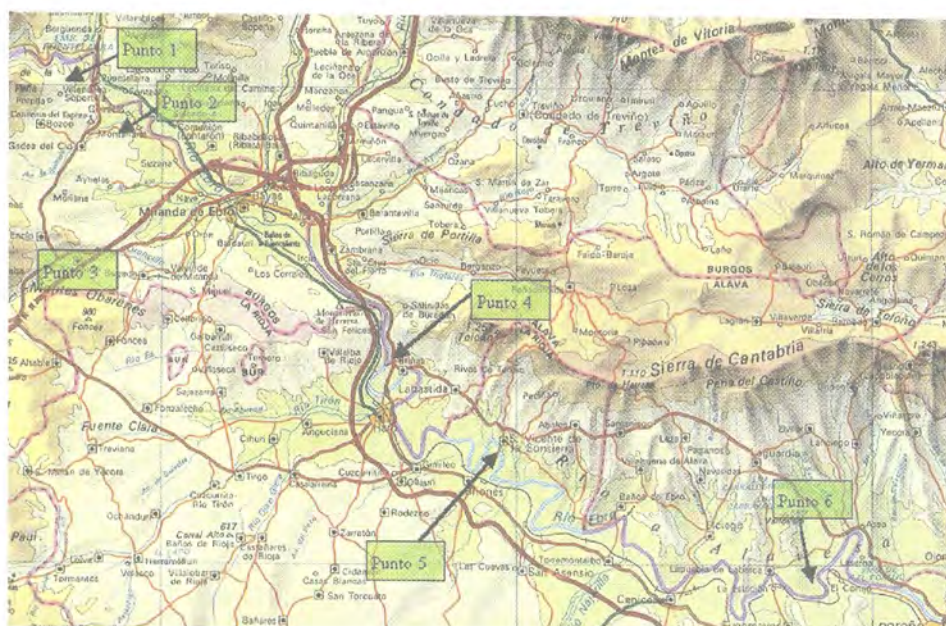


Figura 3.1. Ubicación de los puntos de muestreo en las campañas de trazador realizadas en la zona de influencia de la central nuclear Santa María de Garoña.

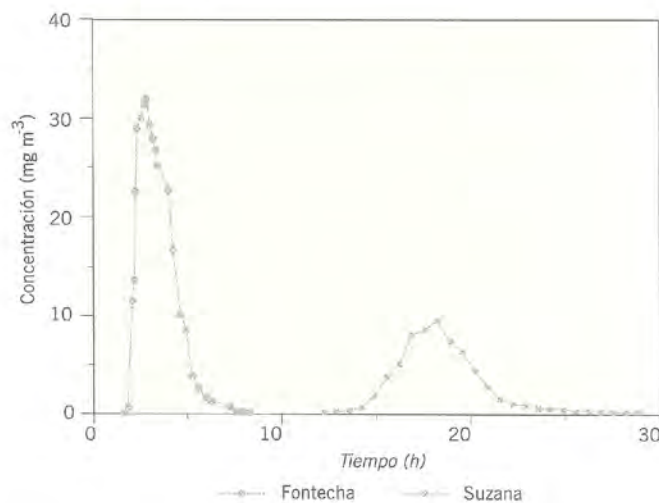
La figura 3.2 recoge las curvas de trazador correspondientes a la inyección realizada el día 24 de julio de 2002, esta campaña corresponde a un régimen de caudal alto en el río Ebro. Las características más significativas que ha puesto de manifiesto el análisis cualitativo de estas curvas son las siguientes.

- Las distribuciones correspondientes a la primera estación de toma de muestras presentan un frente de concentración abrupto con un desarrollo temporal relativamente corto. Esta asimetría de la curva de trazador se debe a la acción combinada de tres efectos: la acción del periodo convectivo, que desarrolla distribuciones muy sesgadas, la influencia de las zonas muertas y la dispersión que la mancha experimenta en el periodo de tiempo que dura la toma de muestras. Se debe destacar, que de forma visual, se detectó que el paso de la mancha por la margen derecha y centro de la corriente se adelantó respecto al paso de

la mancha por la margen izquierda, margen desde la cual se tomaron las muestras. No obstante, esta apreciación puede ser un efecto óptico y su realidad se comprobará en el análisis de los resultados.

- La distribución tomada en la segunda estación de muestreo presenta un tiempo de paso mayor y una clara tendencia hacia una mayor simetría. Este cambio se debe, fundamentalmente, a que los efectos de la dispersión actúan contra la morfología desarrollada en el periodo convectivo.
- La concentración del máximo de la curva experimenta una rápida atenuación con la distancia.
- La extensión temporal de las distribuciones aumenta con la distancia al punto de inyección. Este hecho se debe a la dispersión longitudinal que la mancha experimenta entre cada dos estaciones de toma de muestras. Esta dispersión tiene como consecuencia que la mancha de trazador presente un tiempo de paso de 6,58 h en la primera estación de muestreo y se extienda hasta 16,67 h en la segunda.

Figura 3.2.
Distribuciones de concentración vs tiempo correspondientes a la inyección en la central hidroeléctrica de PuenteIarrá.



Los comentarios generales realizados en párrafos anteriores también son aplicables a las distribuciones obtenidas en la inyección realizada con un régimen de caudal bajo. Solamente existen diferencias en los valores cualitativos de los estadísticos de las distribuciones de trazador que se comentaran en el apartado de modelización.

Mediante la inyección realizada a la salida de turbinas de la central hidroeléctrica de Cabriana se pretende estudiar las propiedades dispersivas del tramo denominado Ebro Medio. Igual que en el tramo anterior se realizaron dos inyecciones: una en régimen de caudal bajo y otra en régimen de caudal alto. Las cantidades de rodamina B inyectadas fueron de 6.000 g cuando el caudal era bajo y 12.000 g en la campaña realizada en régimen de caudal alto. En ambos casos la rodamina fue disuelta, previamente, en ácido acético y agua.

La inyección se realizó desde el final del contrafuerte central de la bocana de la salida de turbinas de la central hidroeléctrica de Cabriana.

En el seguimiento de la evolución de la mancha, se han tomado un total de 300 muestras válidas en cuatro estaciones de muestreo y en cada una de las campañas realizadas. En la tabla 3.2 se recoge la ubicación de cada una de las estaciones y en la figura 3.1 se señala su situación en un plano.

Estación	Coordenadas (U.T.M.)	Distancia P. inyección (m)	Margen del río	Localidad
3	05-0465/47-2552	2.860	Izquierda	Miranda de Ebro
4	05-1398/47-1670	22.810	Izquierda	Briñas (1)
5	05-1950/45-0985	42.569	Derecha	S. Vivente de la Sonsierra
6	05-3683/47-0386	82.242	Derecha	Lapuebla de la Barca

Tabla 3.2. Situación de las estaciones de muestreo en el Ebro medio

(1) En la campaña realizada con un régimen de caudal bajo, la situación de la cuarta estación de muestreo se encontraba situada 2.000 m aguas arriba de la ubicación indicada en la tabla.

Aunque para el estudio experimental del tramo de río Ebro comprendido entre la presa de Puentelarrá y la cola del embalse del Cortijo se han realizado dos inyecciones diferentes, según se ha explicado más arriba, a la hora de numerar las estaciones de muestreo, no se ha establecido discontinuidad en la numeración entre el primer subtramo y el segundo. De tal manera que, a la estación situada en Miranda de Ebro que sería la estación número 1 del segundo subtramo, se le ha denominado estación 3.

Las ubicaciones de las estaciones de muestreo han sido las mismas en las dos campañas realizadas, salvo en el caso de la estación número 4. En la campaña realizada en régimen de caudal bajo esta estación estaba situada en las proximidades de la localidad de Haro. Durante el tiempo transcurrido entre las dos campañas se ha construido en el río una nueva presa que da servicio a la central hidroeléctrica de El Molino Viejo. Como consecuencia de la obstrucción que supone al flujo la nueva presa, la ubicación de la antigua estación ha quedado inundada. La nueva ubicación se encuentra aguas abajo de la primitiva, en la localidad de Briñas.

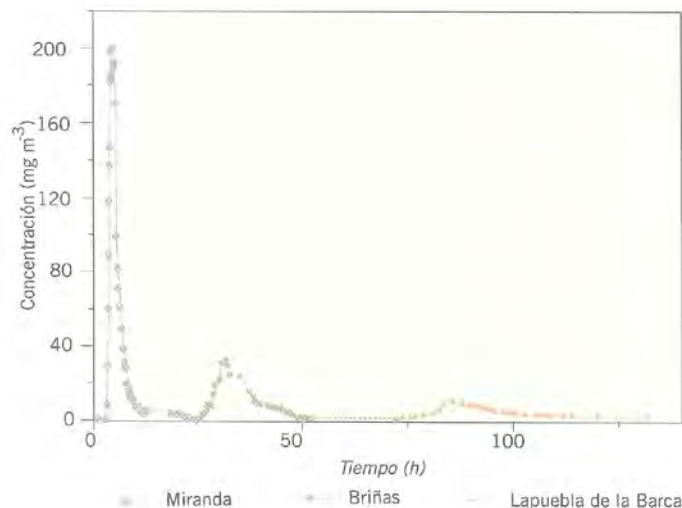
La figura 3.3 recoge las curvas de trazador correspondientes a cada una de las estaciones de muestreo en la campaña realizada con régimen de caudal alto. Las características más significativas que ha puesto de manifiesto el análisis cualitativo de estas curvas son las siguientes:

- Las distribuciones correspondientes a la primera estación de toma de muestras presentan un frente de concentración abrupto con un desarrollo temporal relativamente corto, en tanto que las colas abarcan la mayor parte del tiempo de paso de la mancha. Esta asimetría de la curva de trazador se debe

a la acción combinada de tres efectos: la acción del periodo convectivo, que desarrolla distribuciones muy sesgadas, la influencia de las zonas muertas y la dispersión que la mancha experimenta en el periodo de tiempo que dura la toma de muestras.

- Las distribuciones tomadas en las estaciones de muestreo situadas aguas abajo de la primera presentan tiempos de paso mayor y una clara tendencia hacia una mayor simetría. Este cambio se debe, fundamentalmente, a que los efectos de la dispersión actúan contra la morfología desarrollada en el periodo convectivo.
- La concentración del máximo de la curva experimenta una rápida atenuación con la distancia. La variación de la concentración máxima con la distancia al punto de inyección es de tipo exponencial. La disminución que experimenta la concentración máxima entre la primera y segunda estación es mucho mayor que la experimentada entre esta última y la tercera estación.
- La extensión temporal de las distribuciones aumenta con la distancia al punto de inyección. Este hecho se debe a la dispersión longitudinal que la mancha experimenta entre cada dos estaciones de toma de muestras. Esta dispersión tiene como consecuencia que la mancha de trazador presente un tiempo de paso de 21,66 h en la primera estación de muestreo y se extienda hasta 31 h y 135,5 h en la segunda y tercera estaciones, respectivamente.
- En la campaña comentada se perdió la mancha de trazador en la estación de San Vicente de la Sonsierra debido a cambios en la operación de las centrales hidroeléctricas instaladas aguas arriba de dicha estación. En la campaña realizada con régimen de caudal bajo, si se midió la distribución de trazador en esta estación.

Figura 3.3.
Distribuciones de concentración - tiempo correspondientes a la inyección en la central hidroeléctrica de Cabriana.



Los comentarios generales realizados en párrafos anteriores también son aplicables a las distribuciones obtenidas en la inyección realizada con un régimen de caudal bajo. Solamente existen diferencias en los valores cualitativos de los estadísticos de las distribuciones de trazador que se comentaran en el apartado de modelización.

2.1.2. Tramo de influencia de la central nuclear de Ascó

Igual que en el tramo de influencia de la central nuclear Santa María de Garoña se realizaron dos inyecciones: una en régimen de caudal bajo y otra en régimen de caudal alto. Las cantidades de rodamina B inyectadas fueron de 15.000 g cuando el caudal era bajo y 30.000 g en la campaña realizada en régimen de caudal alto.

En las dos campañas, la inyección se realizó desde el puente construido sobre la carretera que une las localidades de Ascó y Vinebre, y que se encuentra situado unos metros aguas abajo de la descarga de la central nuclear.

En el seguimiento de la evolución de la mancha, se han tomado del orden de 460 muestras válidas en cinco estaciones de muestreo. En la tabla 3.3 se recoge la ubicación de cada una de las estaciones y en la figura 3.4 se señala su situación en un plano.

Estación	Coordenadas (U.T.M.)	Distancia Inyección (m)	Margen del río	Localidad
1	03-0259/45-5655	11.875	Izquierda	Garcia
2	02-9903/45-4526	28.309	Izquierda	Miravet
3	02-9127/45-3926	40.347	Izquierda	Benifallet
4	02-8910/45-3345	48.510	Derecha	Cherta
5	02-9073/45-2100	66.343	Derecha	Tortosa

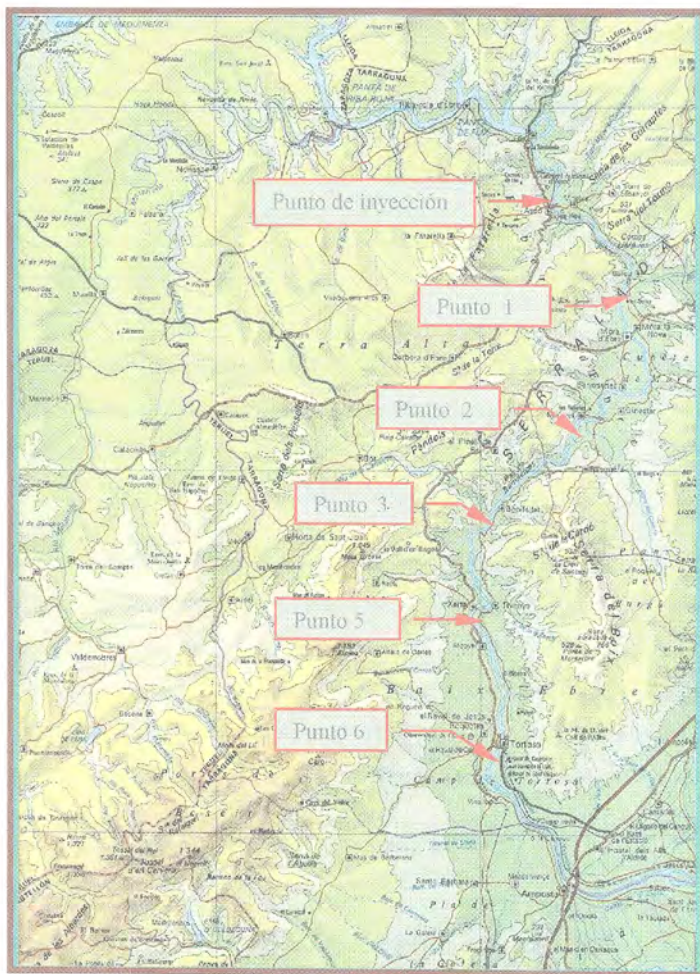
Tabla 3.3. Ubicación de de las estaciones de muestreo en el Ebro bajo

La figura 3.5 recoge las curvas de trazador correspondientes a cada una de las estaciones de muestreo obtenidas en la campaña realizada con régimen de caudal alto. Las características más significativas que ha puesto de manifiesto el análisis cualitativo de estas curvas son las siguientes.

- Las distribuciones correspondientes a la primera estación de toma de muestras presentan un frente de concentración abrupto con un desarrollo temporal relativamente corto, en tanto que las colas abarcan la mayor parte del tiempo de paso de la mancha. Esta asimetría de la curva de trazador se debe a la acción combinada de tres efectos: la acción del periodo convectivo, que desarrolla distribuciones muy sesgadas, la influencia de las zonas muertas y la dispersión que la mancha experimenta en el periodo de tiempo que dura la toma de muestras.
- Las distribuciones tomadas en las estaciones de muestreo situadas aguas abajo de la primera estación presentan tiempos de paso mayor y una clara

- tendencia hacia una mayor simetría. Si bien en todas las distribuciones presentan una larga cola.
- La concentración del máximo de la curva experimenta una rápida atenuación con la distancia. La variación de la concentración máxima con la distancia al punto de inyección es de tipo exponencial. La disminución que experimenta la concentración máxima entre la primera y segunda estación es mucho mayor que la experimentada entre esta última y las restantes estaciones.
 - La extensión temporal de las distribuciones aumenta con la distancia al punto de inyección. Este hecho se debe a la dispersión longitudinal que la mancha experimenta entre cada dos estaciones de toma de muestras. Esta dispersión tiene como consecuencia que la mancha de trazador presente un tiempo de paso de 7,5 h en la primera estación de muestreo y se extiende hasta 11,41 h, 13,25 h, 19,66 h y 20,94 h en la segunda, tercera, cuarta y quinta estaciones, respectivamente.

Figura 3.4. Ubicación de los puntos de muestreo en las campañas de trazador realizadas en la zona de influencia de la central nuclear de Ascó.



Los comentarios generales realizados en párrafos anteriores también son aplicables a las distribuciones obtenidas en la inyección realizada con un régimen de caudal bajo. Solamente existen diferencias en los valores cualitativos de los estadísticos de las distribuciones de trazador que se comentaran en el apartado de modelización.

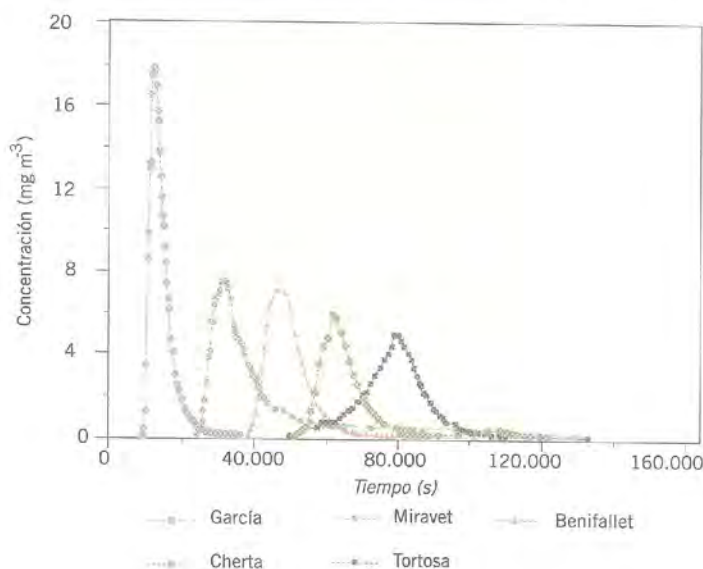


Figura 3.5. Distribuciones de concentración - tiempo correspondientes a la inyección en Ebro bajo.

2.1.3. Tramo de Influencia de la central nuclear de Trillo

En la zona de influencia de la central nuclear de Trillo se han realizado campañas de trazador en dos tramos.

- Tramo comprendido entre el dique del embalse de La Ermita y la cola del embalse de Entrepeñas.
- Tramo de interacción entre el tramo de río anterior y el propio embalse de Entrepeñas.

Tramo comprendido entre el dique del embalse de La Ermita y la cola del embalse de Entrepeñas

El tramo de río comprendido entre los embalses de La Ermita y Entrepeñas ha presentado en este periodo de tiempo una longitud aproximada de 5 km y en él se han realizado un total de tres experimentos de inyección de trazador, con regímenes de caudal bajo, medio y alto.

El punto de inyección elegido se situó inmediatamente aguas abajo de la presa del embalse de La Ermita, a la altura del difusor de descarga de la central nuclear de Trillo. Este punto presenta buenas condiciones para la inyección de trazadores por la elevada turbulencia del flujo, lo que facilita la inmediata distribución del colorante en el medio receptor y acorta la longitud de mezcla.

La tabla 3.4 recoge la localización y distancia al punto de inyección de las estaciones de toma de muestras utilizadas en la primera campaña experimental. La figura 3.6 muestra la localización de estos puntos de muestreo sobre un plano del río Tajo.

Tabla 3.4.
Localización de los puntos de muestreo en las campañas realizadas en el río Tajo.

Estación	Coordenadas (U.T.M.)	Distancia al punto de inyección (m)
1	05-3341/45-0424	611
2	05-3414/45-0446	1.371
3	05-3419/45-0369	2.451
4	05-3442/45-0339	3.277 ⁽¹⁾
5	05-3342/45-0307	4.062
6	05-3267/45-0371	4.877 ⁽²⁾

(1) En la campaña realizada con régimen de caudal alto, la distancia al punto de inyección fue 3.622 m.
(2) En la campaña realizada con régimen de caudal alto no existió esta estación.

La variación de las condiciones del sistema hidrológico entre experimentos, fundamentalmente el estado de flujo del río y la cota de llenado del embalse de Entrepeñas, obligó a un replanteamiento de la localización de los puntos de muestreo para cada una de las campañas. Estos cambios se materializaron en la segunda campaña en la necesidad de:

Figura 3.6.
Ubicación de los puntos de muestreo en las campañas de trazador realizadas en la zona de influencia de la central nuclear de Trillo.



- Reducir la longitud del tramo en estudio. La subida del nivel de la lámina de agua del embalse acortó el tramo de río entre el embalse de La Ermita y la cola del embalse de Entrepeñas hasta una longitud de 4.062 m.
- Cambiar la localización de la cuarta estación de muestreo. La elevación del flujo del río había convertido la localización primitiva del cuarto punto de muestreo en una zona de aguas remansadas, alejada del flujo principal, lo que obligó a trasladarla a otro punto, aguas abajo, que presentara mejores condiciones para la toma de muestras.

El trazador utilizado fue rodamina WT. Se inyectaron 1.5 litros en la campaña realizada con régimen de caudal mas bajo y 3 litros en las otras dos campañas. Las inyecciones se efectuaron en un tiempo aproximado de 1,5 minutos, en el centro de la corriente y a una altura de 15-20 cm sobre la superficie del agua desde la plataforma de la estación de vigilancia número 7 del SAICA, figura 2.2. La fotografía 3.3 recoge la mancha originada en una de la inyecciones efectuadas. En la primera estación de muestreo se tomaron muestras en ambas márgenes del río para comprobar la existencia homogeneidad vertical y transversal en la corriente.



Fotografía 3.3. Mancha de trazador en una de las inyecciones realizadas en el río Tajo.

La figura 3.7 recoge de forma conjunta, las curvas de trazador correspondientes a la campaña realizada con un régimen de caudal más alto.

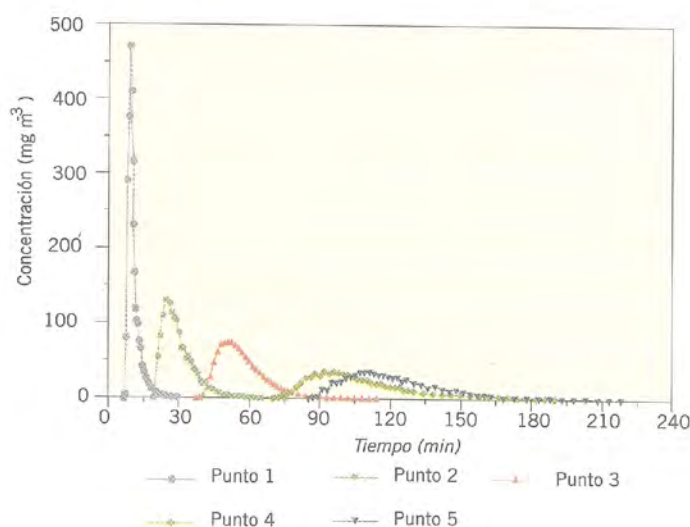


Figura 3.7. Distribuciones de concentración - tiempo correspondientes a la inyección en el Tajo alto.

Los aspectos más destacados de estas curvas de trazador son los siguientes:

- El alto caudal del río se pone de manifiesto en un acortamiento de los tiempos de llegada y de paso de la mancha de trazador por cada uno de los puntos de muestreo. Los tiempos de tránsito, en los que se registraron concentraciones medibles de trazador, han variado entre 24 minutos, para la primera estación, y 140 minutos, para la quinta.
- El tiempo disponible entre el punto de inyección y la primera estación de muestreo es relativamente corto, lo que se refleja en curvas fuertemente sesgadas en las que la influencia del periodo convectivo es todavía fácilmente apreciable.
- La comparación de las áreas y tiempos medios de las dos distribuciones tomadas en la primera estación permiten comprobar que la condición de mezcla completa se verificó antes de que la mancha alcanzara este punto, aunque se aprecia una cierta diferencia en los valores de las concentraciones máximas, debido al menor tiempo de homogeneización transversal.
- La comparación de la morfología de las curvas recogidas en estaciones idénticas en las diferentes campañas muestra una mayor simetría en las distribuciones correspondientes al primer experimento, realizado con caudal más bajo, durante la realización de esta campaña, la corriente circula a una velocidad inferior, proporcionando así mayor tiempo de actuación a la dispersión longitudinal, que tiene efectos positivos sobre el aumento del grado de simetría de las distribuciones.
- El máximo de concentración en una estación de toma de muestras, de acuerdo con el análisis de Taylor, resulta ser inversamente proporcional al área transversal de flujo y a la raíz del producto del coeficiente de dispersión por el tiempo medio. La comparación de las curvas obtenidas en las tres campañas ha permitido comprobar que la atenuación del máximo de concentración frente a la distancia es más intensa a caudales altos. Este resultado se debe a la combinación de dos efectos favorecedores, el aumento de la sección transversal y el coeficiente de dispersión, y a otro que actúa contra esta tendencia, la disminución en los tiempos medios.
- Las curvas obtenidas en la campaña que se analiza como ejemplo han presentado perfiles menos limpios que los correspondientes a la realizada con un caudal más bajo. Los frentes, y sobre todo las colas, de las distribuciones muestran formas aserradas, en las que se producen variaciones significativas de la concentración de trazador. Una posible explicación para este comportamiento puede proporcionarla la obser-

vación experimental de que a bajos caudales el río circula por el cauce principal, en tanto que a niveles de flujo elevados inunda zonas adyacentes, sobre todo aguas abajo de la tercera estación de muestreo. Estas zonas acumulan trazador al paso de la nube principal y lo liberan en forma de pequeñas manchas, por efecto del oleaje de la corriente, como ha podido comprobarse durante la realización de las campañas de campo. El resultado de este comportamiento se traduce en pequeñas inyecciones de trazador en la corriente principal, con los efectos ya vistos en las curvas recogidas.

Confluencia del río Tajo con el embalse de Entrepeñas

Hasta aquí se ha descrito el conjunto de campañas experimentales realizadas con el fin de poner de manifiesto las características del tramo de río, pero no se ha tratado el problema de la caracterización de la confluencia entre dos regímenes de flujo diferentes, esto es, la zona en la que el río Tajo penetra en el embalse de Entrepeñas.

El comportamiento de la cola del embalse de Entrepeñas se ha estudiado mediante un experimento de trazador en el que el colorante fue inyectado en el río Tajo y se estudió la evolución de la mancha dentro de la cola del embalse de Entrepeñas. El estudio se completó mediante perfiles termoconductivimétricos con el fin de relacionar el estado de la lámina de agua del embalse con las características de mezcla y dispersión puestas de manifiesto por el experimento de trazador.

El trazador elegido para la realización del experimento fue rodamina B. La masa de trazador inyectada en esta campaña fue de 10.000 g de rodamina B. La inyección se efectuó el día 3 de marzo de 1998 en un tiempo de 8 minutos dejando caer la rodamina en polvo sobre la superficie del agua. La fotografía 3.4 muestra el punto de inyección utilizado, que coincide con el punto de muestreo 3 de las campañas de trazador realizadas en el tramo de río. El punto fue seleccionado por su elevado nivel de turbulencia, lo que facilita una rápida homogeneización del trazador en la sección transversal de la corriente. Las coordenadas del punto de inyección en el sistema



Fotografía 3.4. Estación de inyección utilizada en el experimento de trazador realizado en la cola del embalse de Entrepeñas.

U.T.M., recogidas mediante un sistema de navegación vía satélite, fueron 05-3419/45-0369. La distancia entre este punto y la posición media de la cola del embalse durante el periodo de estudio ha sido de unos 2.400 m que, junto con la buena turbulencia de la corriente, permitieron garantizar el cumplimiento de la condición de mezcla completa antes de que la mancha alcanzara la cola del embalse.

La toma de muestras para la caracterización de la mancha de trazador en la zona alta del embalse se realizó entre los días 5 y 7, fecha en la que la concentración de trazador en el agua alcanzó el límite de detección del fluorímetro. La toma de muestras diaria se realizó en dos etapas:

- La primera consistió en un recorrido longitudinal de la mancha en sentido ascendente en el que se tomaron muestras de la superficie del agua en el centro del vaso del embalse. La localización de cada uno de los puntos de muestreo utilizado se fijó mediante un equipo de navegación GPS.
- La segunda etapa, realizada en sentido descendente, incluyó la toma de muestras a diversas profundidades y en más de un punto de la sección transversal del embalse, para verificar la distribución del trazador dentro de la masa de agua.

Esta secuencia de trabajo se realizó a las 44 h, 68 h y 92 h de la inyección de trazador. A las 44 h de realizada la inyección, se tomaron muestras de agua en la zona del embalse comprendida entre distancias al punto de inyección de 4.400 m y 10.787 m. En este tramo se tomaron muestras en 17 puntos, y en cada uno de ellos, en superficie y a 5 m de profundidad. Transcurridas 68 h, el muestreo se realizó en la zona del embalse comprendida entre 8.320 y 10.855 m del punto de inyección y 0,2 y 4 m de profundidad. Transcurridas 92 h desde la realización de la inyección, la toma de muestras se realizó en una zona del embalse comprendida entre 8.444 y 13.570 m de distancia al punto de inyección y a 0,3, 6 y 8 m de profundidad. En aquellos puntos en los que el embalse presentaba una anchura considerable, la toma de muestras se ha realizado en dos puntos de la sección transversal, localizados, aproximadamente, a una distancia de 1/3 de la anchura desde cada orilla.

Así mismo, durante la realización de la campaña se midieron los perfiles de temperatura y conductividad eléctrica del agua para los puntos extremos abarcados por la campaña de trazador con un doble fin de caracterizar la estructura de densidades de la lámina de agua de verificar si la lámina de agua presentaba diferencias significativas en el tramo de embalse estudiado en el experimento de trazador. Estas medidas indicaron que el embalse mostraba uniformidad en toda la masa de agua.

La evolución longitudinal y en profundidad de la mancha de trazador se muestra mediante las figuras 3.8 y 3.9.

La primera de ellas contiene las distribuciones correspondientes al muestreo superficial realizado sobre el centro del cuerpo del embalse 68 y 92 h después de la inyección.

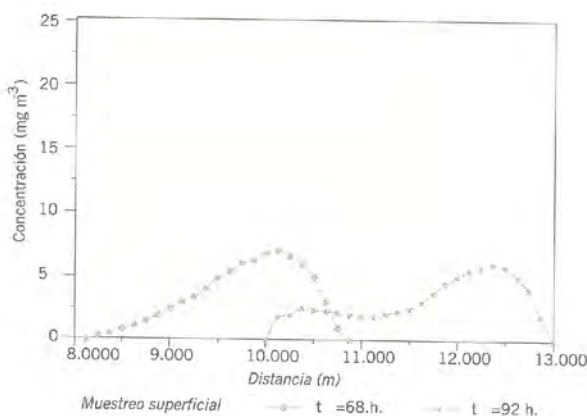


Figura 3.8. Distribuciones superficiales de trazador 68 y 92 horas después de la inyección en la confluencia del río Tajo y el embalse de Entrepeñas.

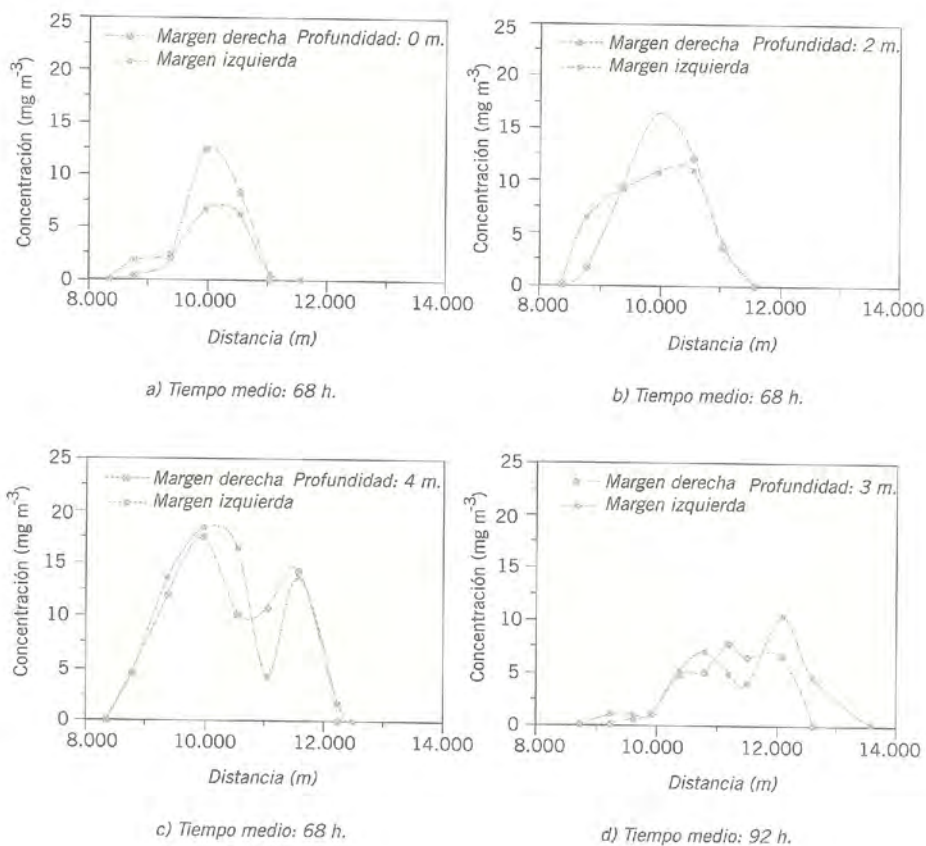


Figura 3.9. Distribuciones a diferentes profundidades 68 y 92 horas después de la inyección en la confluencia del río Tajo y el embalse de Entrepeñas.

La evolución de la mancha de trazador en las 24 horas que separa ambos muestreos ha presentado las siguientes características:

- La concentración del máximo de la curva experimental ha experimentado una atenuación longitudinal como consecuencia de los efectos dispersantes y diluyentes de la masa de agua de la cola del embalse.
- La extensión espacial de la mancha aumenta con la distancia al punto de inyección. Este hecho se debe a la dispersión longitudinal, que la mancha experimenta entre cada las dos sesiones de toma de muestras.

El conjunto de distribuciones de trazador recogidas en la figura 3.9 ha permitido verificar que, simultáneamente con el transporte y dispersión del trazador, se producen los siguientes procesos:

- La mancha de trazador experimenta una inmersión a medida que se adentra en el cuerpo del embalse. Esta inmersión puede detectarse en las diferencias de concentración de rodamina con la profundidad 68 horas después de la inyección, figura 3.9 a, b y c, momento en el que la máxima concentración no se encontraba en la superficie sino a 4 m de profundidad.
- Este efecto de inmersión, que se debe a diferencias de densidad entre el agua del río y la del medio receptor, tiene como consecuencia que las curvas de trazador no sean conservativas, esto es, el área bajo cada una de las curvas no es la misma. Como ejemplo, las dos distribuciones correspondientes al muestreo superficial a las 68 y 92 horas después de la inyección, figura 3.8, presentan una diferencia en el área superficial próxima al 30%.
- A pesar de estas diferencias, siempre puede indicarse que a una cierta profundidad que ya ha sido afectada por la nube de trazador, el efecto de dispersión ocasiona una caída de la concentración, como muestra la figura. 3.9 d, correspondiente a la toma de muestras realizada 92 horas después de la inyección y a una profundidad de 3 m.

2.2. Resultados de campañas de campo en embalses

Para la caracterización de embalses se han realizado dos tipos de campañas de campo: campañas de caracterización vertical y campañas de caracterización horizontal.

Las campañas de caracterización vertical implican únicamente la medida de los perfiles de temperatura y conductividad desde puntos de fácil acceso

como puentes o presas y siempre buscando poder controlar la totalidad del espesor de la lámina de agua. Se han realizado 9 campañas en cada uno de los embalses estudiados. La realización de las campañas en cada uno de los embalses se ha distribuido a lo largo de todo el ciclo anual con el fin de controlar la evolución del estado de la lámina de agua a lo largo de dicho ciclo. Las localizaciones utilizadas como puntos de medida para las campañas de caracterización vertical en cada uno de los embalses han sido las siguientes:

- *Embalse de Sobrón*: la coronación de la presa y el puente de acceso a la localidad de Tobalinilla, que cruza el embalse.
- *Embalse de PuenteIarrá*: la coronación de la presa.
- *Embalse de Entrepeñas*: la coronación de la presa y el puente situado en el P.K. 59 de la carretera comarcal 204 (Viaducto de Entrepeñas), que cruza el embalse.
- *Embalse de Bolarque*: la coronación de la presa.
- *Embalse de Zorita Hidráulica*: la coronación de la presa y el puente de la carretera comarcal 200, que cruza el embalse.
- *Embalse de Almoguera*: la coronación de la presa y la carretera Almoguera-Illana, que discurre justo delante de la misma.
- *Embalse de Torrejón-Tajo*: la coronación de la presa.
- *Embalse de Cortes II*: la coronación de la presa, estructuras de la central hidroeléctrica de La Muela y el puente de acceso a la localidad de Cortes de Pallas, que cruza el embalse.

La realización de este conjunto de campañas verticales ha permitido acceder a un conocimiento general de los aspectos más significativos relacionados con el ciclo térmico anual de estos embalses.

En total se han realizado 42 campañas de caracterización horizontal en los nueve embalses que se encuentran situados dentro de las zonas de influencia de las centrales nucleares objeto de estudio. En la tabla 3.5 se muestran los embalses estudiados, el sistema hidrológico donde se encuentran situados, la central nuclear de la que puede provenir un vertido que les afecte, la fecha de realización de las campañas.

La presentación en esta memoria de todo el trabajo de campo realizado en embalses resultaría demasiado extensa y repetitiva por lo que se han seleccionado, para cada embalse, algunos de los resultados que permitan explicar adecuadamente su ciclo térmico anual.

El análisis del ciclo térmico de los embalses que se realiza a continuación consta de tres apartados:

Tabla 3.5. Campañas de campo de caracterización horinzontal realizadas en embalses.

Sistema hidrológico	Central nuclear	Embalse	Fecha de realización
Ebro	Santa María de Garoña	Sobrón	25/sept/01
			30/nov/01
			14/mar/02
			21/may/02
			24/jul/02
Tajo	Trillo	Entrepeñas	17/mar/98
			15/jul/98
			14/oct/98
		Bolarque	14/abr/98
			13/jul/98
			21/oct/98
	José Cabrera	Zorita Hidráulica	12/mar/99
			8/may/98
			16/jul/98
		Almoguera	13/oct/98
			17/abr/98
			16/jul/98
		Estremera	13/oct/98
			5/jun/01
			4/oct/01
			18/dic/01
	Almaraz	Arrocampo	11/mar/02
			28/may/02
			12/jul/02
			11/jul/01
27/sep/01			
Torrejón-Tajo		11/dic/01	
		7/mar/02	
		14/may/02	
		11/jul/01	
		27/sep/01	
		15/mar/02	
		30/may/02	
		25/jun/02	
		30/oct/02	
19/jun/01			
Júcar	Cofrentes	Cortes II	2/oct/01
			28/nov/01
			6/mar/02
			15/may/02
			10/jul/02

- Análisis de los perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica del agua.
- Análisis de los perfiles longitudinales obtenidos en las campañas horizontales para determinar la continuidad horizontal del estado de estratificación.
- Análisis de la evolución de la temperatura y conductividad eléctrica a lo largo del ciclo térmico anual.

- Análisis de la evolución longitudinal de la profundidad de Secchi a lo largo del ciclo anual.

Los puntos de medida fueron fijados tal como se describe en el apartado 3.1.2, en el que se describe la metodología seguida en las campañas en embalses. No obstante en alguna de las campañas, las ubicaciones fijadas con antelación se han variado, bien para estudiar algún aspecto detectado durante las medidas o bien por la imposibilidad de fijar la embarcación en la posición predeterminada.

2.2.1. Embalse de Sobrón

La experimentación realizada en el embalse de Sobrón ha incluido un total de 5 campañas de caracterización horizontal. En la tabla 3.5 se recogen las fechas en que se realizaron dichas campañas y en la figura 3.10 se muestra un plano del embalse.

En cada una de las campañas se han realizado medidas en un número de puntos que oscila entre 9 y 18. Estos puntos se distribuyen a lo largo del embalse. En la zona alta del embalse se han realizado medidas hasta que los perfiles de temperatura y conductividad eran planos, lo que indica que el agua contenida en esa parte del embalse se encuentra fuera de la influencia de la descarga de la central nuclear Santa María de Garoña. En la zona de la descarga de la central nuclear, el número de medidas ha sido más alto para determinar la influencia de dicha descarga en la homogeneidad transversal y vertical de la masa de agua. Entre el ensanchamiento del vaso del embalse que existe aguas abajo de la descarga de la central nuclear y el puente de Tobalinilla, el número de puntos de muestreo fue más alto para estudiar algunas anomalías que se detectaron en la estructura de la lámina de agua. Aguas abajo de este puente, en todas las campañas se han realizado medidas en cuatro puntos.

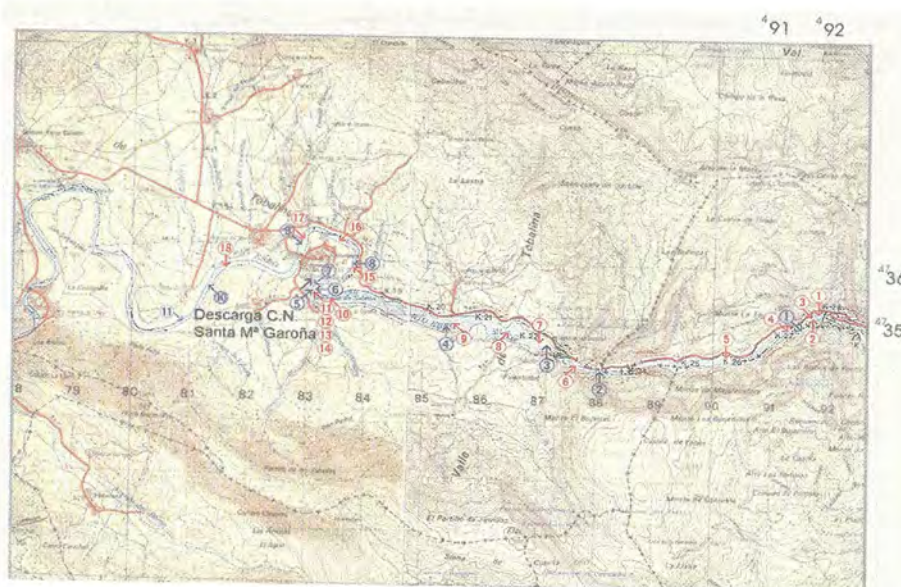


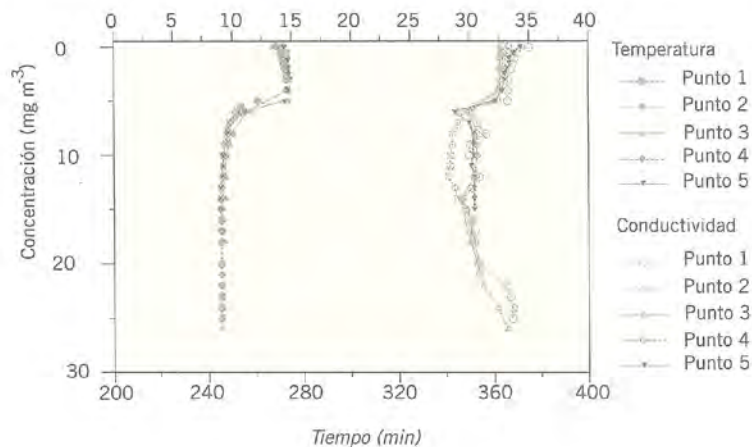
Figura 3.10. Ubicación de los puntos de medida en las campañas realizadas los días 25/09/2001 y 30/11/2001 en el embalse de Sobrón.

a) *Análisis de los perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica.*

La zona comprendida entre el puente de Tobalinilla y la presa del embalse es la de mayor profundidad. Las características más significativas que ha puesto de manifiesto el análisis cualitativo de los perfiles medidos en esta zona en las campañas, son las siguientes.

- En todas las campañas realizadas, la lámina de agua se encuentra estratificada. A modo de ejemplo en la figura 3.11 se muestran los perfiles de temperatura y conductividad medidos en la campaña de 30 de noviembre de 2001. La lámina de agua se encuentra dividida en tres capas bien diferenciadas. Una capa superior bien mezclada, epilimnium. Una capa que presenta un alto gradiente de temperatura y conductividad eléctrica, metalimnium. Por debajo de ésta se desarrolla una capa bien mezclada, hipolimnium. La fecha en que se realizó la campaña corresponde a la época del ciclo térmico anual en que no se produce estratificación natural, por lo que la estratificación comentada corresponde a una estratificación artificial ocasionada por el agua vertida por la central nuclear que se encuentra a mayor temperatura que la que ocupa el vaso del embalse. Los perfiles de temperatura medidos en la campaña de 25 de septiembre de 2001 indican que en esta zona del embalse existe una doble estratificación. La primera termoclina se encuentra situada a la misma profundidad que la termoclina observada en la campaña de 30 de noviembre por lo que se corresponde con la estratificación térmica ocasionada por la descarga de la central nuclear. La segunda se encuentra situada a mayor profundidad. Dado que en la época del año en la que se desarrolló la campaña es época en que el embalse puede estar estratificado, se considera que esta termoclina situada a mayor profundidad corresponde a la termoclina natural.
- Los perfiles medidos en todos los puntos son prácticamente iguales. Lo que indica la gran uniformidad de la masa de agua en el sentido longitudinal.

Figura 3.11.
Perfiles verticales
de temperatura
y conductividad
eléctrica en el
embalse de Sobrón.
Zona: presa del
embalse – Puente
de Tobalinilla.
Campaña:
30/11/01.

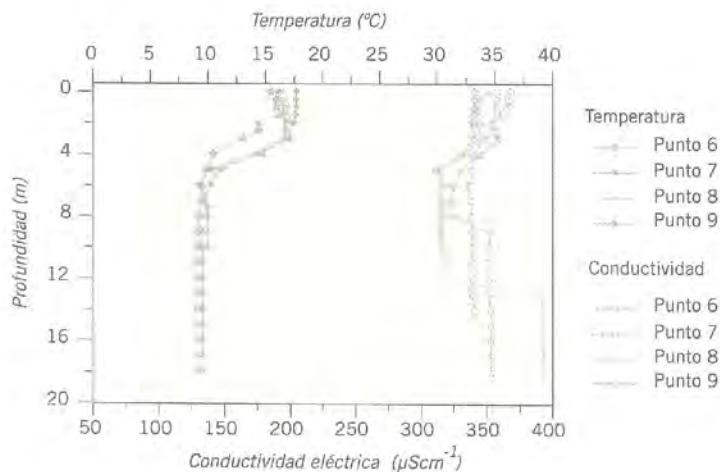


La zona comprendida entre el puente de Tobalinilla y el avenamiento de la descarga de la central nuclear es la parte del embalse que presenta mayor anchura debido a la inundación de llanuras adyacentes al antiguo cauce del río Ebro, figura 3.10. La profundidad, medida en el centro de cada una de las secciones en las que se ha realizado medidas, oscila entre 20 y 10 m. Las menores profundidades corresponden a la zona más próxima a la descarga de la central nuclear. Las características más significativas que evidencian las medidas realizadas son las siguientes.

- Los perfiles de temperatura indican que la masa de agua del embalse está sometida a estratificación térmica, que como ya se comentó en párrafos anteriores, es originada por la descarga de la central nuclear. El aporte de agua presenta mayor temperatura y por lo tanto menor densidad que el agua que contiene el embalse. Debido a ello, las fuerzas de flotabilidad son superiores a las que originan la mezcla y en consecuencia el agua del aporte flota sobre la que contenía originalmente el embalse.
- En ninguna de las campañas se observa homogeneidad longitudinal de la masa de agua, figura 3.12. Si se comparan los perfiles térmicos medidos en diferentes puntos de esta zona, se observa que solamente existe homogeneidad térmica en las capas de agua más profundas. En las capas superiores de agua existe un gradiente de temperatura. La temperatura aumenta con la proximidad a la descarga de la central nuclear. La falta de uniformidad térmica es consecuencia de la estratificación a que se encuentra sometida la lámina de agua. Debido al intercambio de calor entre el medio hídrico y la atmósfera, la temperatura del agua de la capa superior disminuye con la distancia al avenamiento del canal de descarga. Las capas más profundas se encuentran aisladas por el efecto de la termoclina, por lo tanto, no existe intercambio de calor y el agua que ocupa estas capas más profundas es, térmicamente, uniforme. son semejantes a los ya comentados.
- Todos los perfiles de conductividad eléctrica medidos en puntos situados aguas abajo de la descarga de la central nuclear muestran la falta de homogeneidad química de la masa de agua. Salvo en la capa más superficial de agua, la conductividad disminuye con la profundidad hasta profundidades comprendidas entre 4 y 14 m, dependiendo del punto considerado e independientemente de la campaña que se trate. Para profundidades mayores, la conductividad aumenta con la profundidad y en algunos puntos, después de pasar por un máximo, disminuye y permanece constante para las capas más profundas. La magnitud del aumento de conductividad depende del punto considerado. Esta estructura de la lámina de agua es el resultado de la combinación de un aporte de mayor salinidad que la del agua del embalse y la estratificación térmica a que se

encuentra sometida esta parte del embalse. La barrera que supone la termoclina para los fenómenos de difusión y mezcla dificulta la mezcla y profundización del aporte de mayor salinidad y queda atrapado en una capa de la masa de agua del embalse. En todas las campañas realizadas se ha puesto de manifiesto que la conductividad del agua vertida por la central nuclear es igual o incluso inferior a la del agua aportada por el río Ebro. Este hecho junto a que el máximo de conductividad se encuentra aguas abajo de la descarga de la central nuclear hace pensar que no es esta descarga la que aporta agua de mayor salinidad y debe ocurrir en un punto intermedio entre los puntos de medida 8 y 10, figura 3.10. Otra posibilidad sería que la central nuclear realice vertidos esporádicos de agua con mayor conductividad y menor temperatura que la del aporte habitual. Si estos vertidos esporádicos se han realizado un tiempo antes de realizar la campaña, la nube de vertido ha tenido tiempo de profundizar y desplazarse a través de la masa de agua, por lo que no ha podido detectarse en las proximidades del avenamiento del canal de descarga. La imposibilidad de disponer de medidas continuas de las variables no permite concluir cual de las dos hipótesis es la correcta.

Figura 3.12.
Perfiles verticales
de temperatura
y conductividad
eléctrica en el
embalse de
Sobrón. Zona:
puente de Tobali-
nilla - central
nuclear de Sta.
María de Garoña.
Campaña:
30/11/01.



En la zona del embalse situada aguas arriba del avenamiento de la descarga de la central nuclear, el vaso del embalse se estrecha y ocupa el cauce del río. En los perfiles de temperatura y conductividad medidos en esta zona, por ejemplo el día 30 de noviembre de 2001, figura 3.13, se aprecia la estratificación térmica ocasionada por la descarga de la central nuclear hasta el punto de medida 18, situado a alrededor de 15.700 m de la presa del embalse. A esta distancia de la presa los perfiles de temperatura y conductividad son planos lo que indica que aguas arriba de esta sección no existe influencia de la central nuclear.

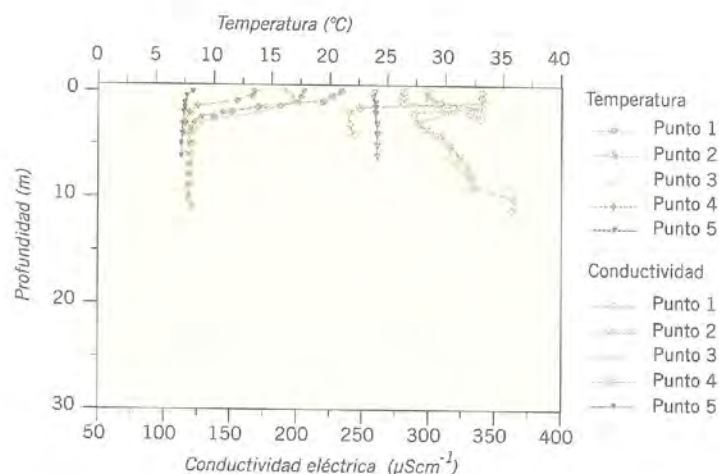


Figura 3.13. Perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica en el embalse de Sobrón. Zona: descarga central nuclear de Sta. María de Garoña – final zona de influencia. Campaña: 0/11/01.

En las campañas realizadas los días 14 de marzo, 21 de mayo y 24 de julio de 2003 se ha observado la misma estructura de la lámina de agua que la descrita para la campaña realizada el día 30 de noviembre de 2001. En época de estratificación, solamente, se dispone de los resultados de la campaña realizada el día 25/09/01. Sin embargo, los resultados medidos en esta campaña, en el punto 1, punto más próximo a la presa, se han comparado a los obtenidos en las campañas de caracterización vertical realizadas en época de estratificación natural y los resultados son muy parecidos.

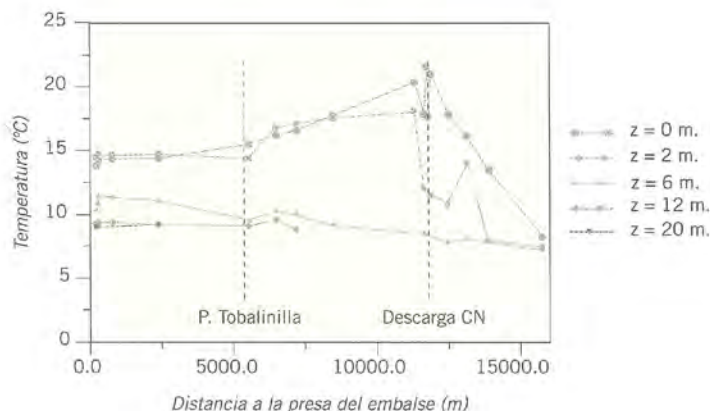
b) Análisis de los perfiles longitudinales de temperatura y conductividad eléctrica.

La variación de la temperatura del agua con la distancia a la presa del embalse es semejante en todas las campañas. La masa de agua se encuentra segmentada a lo largo de todo el embalse, figura 3.14. En la capa superior de agua, la temperatura aumenta con la distancia a la presa del embalse hasta la sección donde se encuentra el avenamiento de la descarga de la central nuclear Santa María de Garoña, aguas arriba de este punto la temperatura disminuye con la distancia a la presa. En la capa más profunda de la lámina de agua, la temperatura disminuye ligeramente con la distancia a la presa del embalse.

La estructura de los perfiles longitudinales de conductividad eléctrica es diferente según la campaña que se considere. No se puede establecer un comportamiento general de esta variables a lo largo del embalse.

En ninguno de los perfiles de conductividad medidos se aprecia la influencia de la estratificación térmica provocada por la descarga de la central nuclear, debido a que el agua que ésta devuelve al río presenta una conductividad muy próxima a la del agua que circula por él.

Figura 3.14. Perfiles longitudinales de temperatura en el embalse de Sobrón. Campaña: 30/11/01.



c) Análisis de la evolución de la temperatura y conductividad eléctrica a lo largo del ciclo anual.

La variación de la temperatura a lo largo del ciclo anual se hace patente en toda la lámina de agua. Aguas arriba de la descarga de la central nuclear, en la zona que no existe influencia de ésta, la temperatura experimenta una variación máxima de 13,1 °C a lo largo del ciclo anual, como consecuencia del intercambio de calor con la atmósfera. En la zona de descarga de la central nuclear la máxima diferencia de temperatura es de 15 °C. Esta diferencia máxima de temperaturas es superior a la que se ha medido en el resto del embalse, debido a que, en esta zona, el intercambio de calor con la atmósfera se intensifica en invierno como consecuencia del mayor gradiente de temperatura existente entre el agua caliente, que vierte la central nuclear, y el aire que se encuentra en contacto con el agua. En la zona próxima a la presa la lámina de agua pierde su uniformidad vertical y se manifiesta la termoclina artificial durante todo el periodo de estudio y la natural desde el principio del verano y final del otoño.

La conductividad eléctrica de las capas superficiales de agua presenta pequeñas oscilaciones a lo largo del ciclo anual, y presenta un ligero aumento a medida que transcurre el invierno y la primavera. Una excepción a este comportamiento se presenta en las capas de agua más profundas durante las campañas realizadas en verano, en que se produce un brusco aumento de conductividad. Este aumento de conductividad puede ser debido a la presencia de la termoclina natural que impide la mezcla de algún vertido que se haya producido en un tiempo anterior al del periodo de estratificación natural.

d) Análisis de la evolución de la Profundidad de Secchi

Los valores de la Profundidad de Secchi oscilan entre 0,9 y 2,5 m, estos valores de la Profundidad de Secchi corresponden a aguas con baja o media penetrabilidad de la radiación solar. No existe un comportamiento claro de la evolución de este

parámetro en la dirección longitudinal, si bien, la tendencia general es a disminuir ligeramente con la distancia a la presa del embalse. La evolución temporal de este parámetro es más clara, la Profundidad de Secchi aumenta a medida que avanzan el otoño e invierno y disminuye durante la primavera y el verano.

2.2.2. Embalse de Puentelarrá

El embalse de Puentelarrá es un embalse de pequeño tamaño, poca profundidad y un tiempo de residencia muy bajo. Estas características hacen que sea un embalse de dinámica muy simple que hace que el embalse presente homogeneidad vertical en toda su masa de agua a lo largo de todo el ciclo anual. Los valores de la temperatura y conductividad eléctrica de la masa de agua están determinados por las características del agua que aporta al embalse el embalse de Sobrón. Debido a ello no se va a realizar una descripción más detallada de los resultados obtenidos en las campañas realizadas en este embalse.

2.2.3. Embalse de Entrepeñas

La experimentación realizada en el embalse de Entrepeñas ha incluido un total de 3 campañas de caracterización horizontal. Las fechas en que se realizaron las campañas se muestran en la tabla 3.5 y la figura 3.15 muestra un plano del embalse.

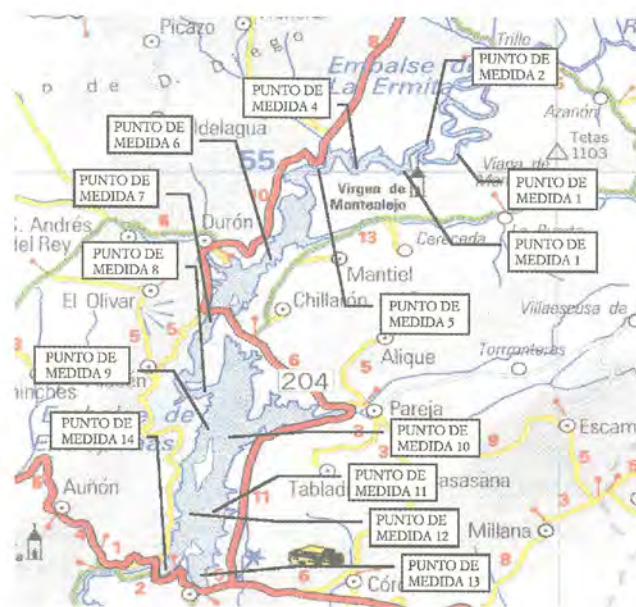


Figura 3.15. Ubicación de los puntos de medida en la campaña realizada el día 15/7/97 en el embalse de Entrepeñas.

En cada una de las campañas se han realizado medidas en 14 puntos situados a lo largo del embalse. Así mismo y en aquellas secciones cuya anchura lo requiera, se han realizado medidas en varios puntos de la sección.

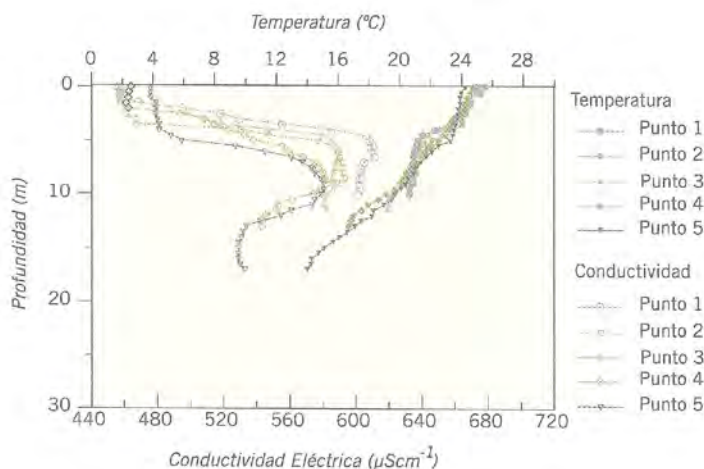
a) *Análisis de los perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica.*

La morfología de los perfiles recogidos en todas las campañas de campo ha puesto de manifiesto la existencia de tres zonas en el embalse, que coincide con la descripción del sistema hidrológico realizada en el apartado de Documentación.

La *zona alta* está integrada por los cinco primeros puntos de muestreo y en ella pueden diferenciarse, a su vez, dos subtramos integrados, respectivamente, por los puntos 1 a 3 y 3 a 5.

En la figura 3.16 se muestran a modo de ejemplo los perfiles que se midieron en esta zona en la campaña realizada el día 15 de julio de 1998.

Figura 3.16. Perfiles de temperatura y conductividad eléctrica medidos en la zona alta del embalse de Entrepeñas. Campaña: 15/07/98.



Los perfiles medidos en los tres primeros puntos responden a las siguientes características:

- La capa superficial, de profundidad variable entre 1 y 3,5 m, presenta una conductividad uniforme con valores próximos a 460 $\mu\text{S cm}^{-1}$.
- La capa intermedia, situada bajo la anterior, llega hasta los 4,5 o 5 m de profundidad y en ella se aprecia un brusco aumento de la conductividad eléctrica hasta valores comprendidos entre 580 y 600 $\mu\text{S cm}^{-1}$.
- A profundidades mayores y hasta el fondo del cauce, que en esta zona del embalse se encuentra entre los 9 y 11 m de profundidad dependiendo de la posición, la conductividad se mantiene prácticamente constante.
- La temperatura experimenta un descenso continuado y prácticamente uniforme entre la superficie y el fondo, a excepción de la zona con mayor gradiente de conductividad, en la que este descenso es ligeramente más acusado. La caída global de temperatura en todo el perfil oscila entre 4 y 6 °C.

En los puntos de muestreo 4 y 5 los perfiles medidos presentan las siguientes características:

- La capa superficial, que abarca hasta cotas comprendidas entre 2 y 5 m de profundidad, presenta valores uniformes de conductividad de $464 \mu\text{S cm}^{-1}$, para el primero de los puntos, y $480 \mu\text{S cm}^{-1}$, para el segundo.
- La capa intermedia, hasta los 13 m de profundidad, está caracterizada por un máximo de la conductividad que se alcanza 9 m por debajo de la superficie del agua, con un valor de $580 - 582 \mu\text{S cm}^{-1}$. A partir del máximo, la conductividad desciende, aunque sin llegar a alcanzar los valores que presenta en la superficie.
- A profundidades mayores de los 13 m, la conductividad tiende a estabilizarse, aunque con una ligera tendencia al descenso hasta el fondo del embalse.

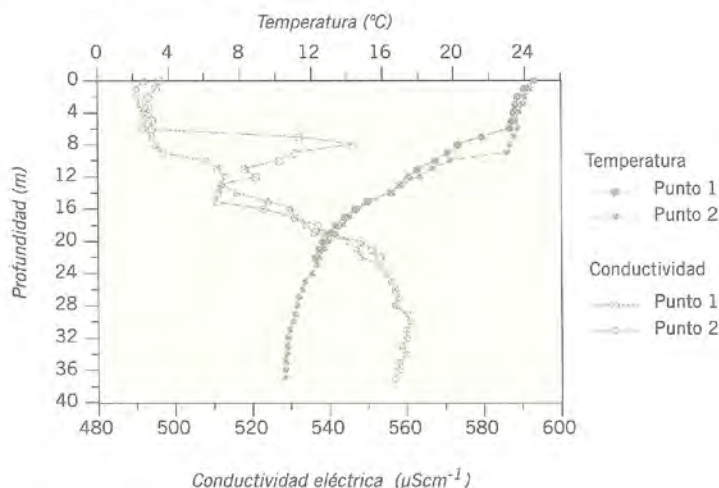
El máximo de conductividad en capas intermedias indica la presencia de un vertido, realizado aguas arriba, que profundiza en el embalse, al mismo tiempo que se desplaza longitudinalmente. Este vertido es, asimismo, la causa probable de la morfología de los perfiles medidos en los tres primeros puntos. En estaciones más próximas al punto de vertido, puntos 1, 2 y 3 éste se ha sumergido en menor medida, por lo que el aumento de conductividad se aprecia en cotas más próximas a la superficie. El menor espesor de la lámina de agua en esta zona del embalse hace que no exista una capa de agua poco afectada por el vertido a profundidades mayores a las que éste se ha sumergido y, por tanto, la conductividad mantiene valores elevados hasta el fondo del embalse.

Los perfiles de temperatura medidos en los puntos 4 y 5 presentan menores diferencias que los perfiles de conductividad. Así, el perfil de temperatura del cuarto punto presenta una tendencia similar a la mostrada por los tres primeros, con un descenso continuado entre la superficie y el fondo. El gradiente térmico medio de este perfil es de $0,63 \text{ }^\circ\text{C m}^{-1}$. En el quinto punto, la estratificación térmica es más clara. La capa superficial, de 5 m de profundidad, presenta un decremento térmico de un solo grado ($24,5 - 23,5 \text{ }^\circ\text{C}$). A profundidades mayores, y hasta el fondo del embalse, la temperatura decae de forma progresiva con un gradiente medio de $0,8 \text{ }^\circ\text{C m}^{-1}$.

La *zona media* del embalse integra los puntos 5 a 7, figura 3.17. El sexto punto de medida muestra un perfil de conductividad intermedio entre los propios de puntos anteriores y los registrados en el cuerpo principal. Los perfiles de conductividad y temperatura medidos en la sección transversal definida por este punto muestran ciertas discrepancias ocasionadas por la diferencia de espesor de la capa uniforme superficial, de 6 m en la margen derecha y de 8 m en la margen izquierda. Por debajo de esta capa homogénea, cuya conductividad es de $500 \mu\text{S cm}^{-1}$, ambos perfiles siguen tendencias similares, mostrando una evolución paralela caracterizada por valores máximos y mínimos locales, a profundidades mayores se estabiliza la tendencia de la conductivi-

dad a aumentar con la profundidad para alcanzar, finalmente, valores comprendidos entre 553 y 565 $\mu\text{S cm}^{-1}$.

Figura 3.17.
Perfiles de temperatura y conductividad eléctrica medidos en la zona media del embalse de Entrepeñas. Campaña: 15/07/98.



Las medidas de temperatura muestran, al igual que los perfiles de conductividad, una capa superficial de espesor comprendido entre 6 y 8 m de muy bajo gradiente térmico y temperaturas comprendidas entre los 23 y 24 °C. Por debajo de esta capa superficial, la lámina de agua experimenta un descenso continuado de la temperatura con un gradiente térmico medio próximo a 0,70 °C m⁻¹. La masa de agua, que presenta mayor profundidad en la margen izquierda que en la derecha, vuelve a mostrar, por debajo de los 24 m, una capa en la que la temperatura es prácticamente uniforme y alcanza un valor final de 11,3 °C.

La morfología exhibida por los perfiles de conductividad puede ser explicada si se tiene en cuenta que este punto de medida se haya localizado después del primer ensanchamiento de consideración del cuerpo del embalse. Aguas arriba del ensanchamiento, el embalse tiene una anchura comprendida entre 100 y 200 m, lo que obliga a que el vertido presente curvas de conductividad similares en ambas márgenes, debido a que éstas se encuentran muy próximas. Por el contrario, el ensanchamiento, localizado aguas arriba de este punto de muestreo, hace cambiar el modo de flujo y permite una distribución horizontal menos regular.

El séptimo punto de muestreo se localiza en el viaducto de Entrepeñas. El conjunto de perfiles medidos queda caracterizado por:

- Una capa superficial, de entre 9 y 10 m de profundidad, en la que la conductividad y la temperatura son prácticamente uniformes con valores respectivos de 23,0 – 24,5 °C y 492 – 560 $\mu\text{S cm}^{-1}$.
- Por debajo de esta lámina de agua la conductividad aumenta de forma continuada y progresiva hasta alcanzar valores entorno a 560 $\mu\text{S cm}^{-1}$ en un ran-

go de profundidades comprendido entre 9 y 23 m. Para profundidades mayores, la conductividad se mantiene constante. La temperatura permite, con más claridad que la conductividad, subdividir esta lámina en al menos dos subcapas. La primera de ellas, situada inmediatamente debajo de la capa homogénea, llega hasta los 23 m de profundidad, presenta gradientes térmicos medios elevados próximos a $1\text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$ y contiene la termoclina, donde la temperatura experimenta descensos comprendidos entre $1,5$ y 2°C en un metro de profundidad. Por debajo de esta capa, y hasta la profundidad total, los gradientes térmicos son mucho menores con valores en el entorno de $0,2\text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$. La temperatura medida en el fondo del cauce fue de $10,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

El *cuerpo principal* del embalse incluye los puntos de muestreo 8 a 14. Los extremos de la masa de agua del cuerpo principal se han definido mediante los perfiles de los puntos 8 y 14 que coinciden, respectivamente, con la entrada al cuerpo principal y la presa. El resto de los puntos se han distribuido por la masa de agua para caracterizar tanto la zona ocupada originalmente por el cauce del río como las zonas inundadas por la construcción de la presa.

Los perfiles de conductividad y temperatura medidos en todos los puntos de esta zona, recogidos en la figura 3.18, presentan características comunes y coincidentes con las medidas tomadas desde la presa realizadas en las campañas de caracterización vertical, lo que ha permitido comprobar un buen grado de uniformidad en las características de toda esta masa de agua.

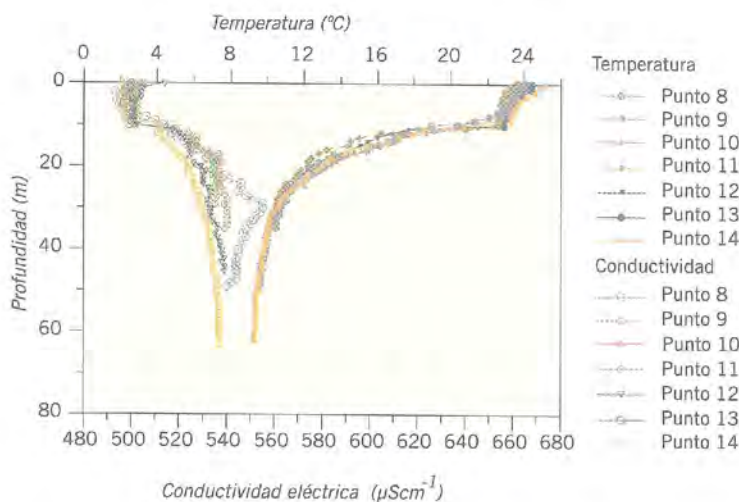


Figura 3.18. Perfiles de temperatura y conductividad eléctrica medidos en el cuerpo principal del embalse de Entrepeñas. Campaña: 15/07/98.

Las diferencias más significativas en la lámina de agua caracterizada por este conjunto de perfiles vienen dadas por las diferencias de profundidad, de modo que aquellos perfiles que sólo registran cotas altas presentan propiedades similares a las capas superficiales de aquellos otros que permitieron alcanzar aguas más profundas. Independientemente de estas consideraciones, esta campaña de carac-

terización horizontal, como el resto de las realizadas en este embalse, ha permitido chequear la homogeneidad horizontal de las características de la masa de agua alojada en el cuerpo principal del embalse.

Una clara prueba de esta uniformidad la proporciona la figura. 3.18 que muestra el perfil medido en el punto 13 situado en el entrante que el embalse presenta frente a la localidad de Sacedón, y que se encuentra alejado de las líneas de flujo más importantes del cuerpo principal.

b) Análisis de los perfiles longitudinales de temperatura y conductividad eléctrica.

Los perfiles longitudinales de temperatura muestran claramente que el embalse de Entrepeñas se encuentra sujeto a estratificación natural durante el verano y principios del otoño. Este hecho se aprecia claramente si se comparan los perfiles longitudinales de temperatura que se muestran en las figuras 3.19 y 3.20 que corresponden a las campañas realizadas los días 13 de marzo y 14 de octubre de 1998.

Figura 3.19.
Perfiles longitudinales de temperatura en el embalse de Entrepeñas.
Campaña:
13/3/98.

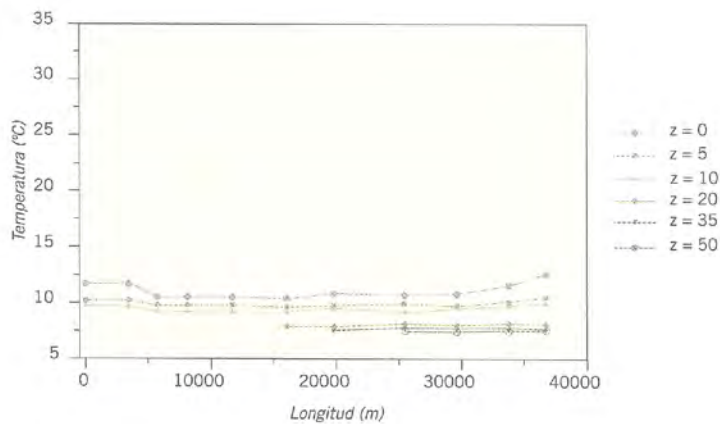
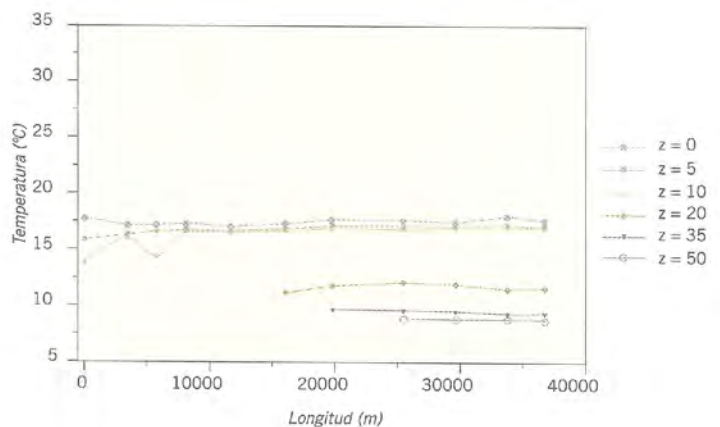


Figura 3.20.
Perfiles longitudinales de temperatura en el embalse de Entrepeñas.
Campaña:
14/10/98.



Los perfiles medidos en la campaña realizada el día 13 de marzo muestran como en esta época del año la lámina de agua es homogénea en toda la extensión del embalse. En la campaña realizada el día 14 de octubre, en aquellas zonas del embalse que presentan una profundidad suficiente, la lámina de agua se encuentra claramente fragmentada. La capa superior, epilimnium se encuentra totalmente homogeneizada y separada por la termoclina de la capa inferior, hipolimnium que presenta un ligero gradiente de temperatura.

Los perfiles longitudinales de conductividad eléctrica no presentan un comportamiento generalizado, estando muy condicionados por la presencia o no de vertidos.

c) Análisis de la evolución de la temperatura y conductividad eléctrica a lo largo del ciclo anual.

El embalse de Entrepeñas, de acuerdo con los trabajos de campo realizados, presenta perfiles térmicos uniformes durante los meses comprendidos entre diciembre y marzo. Las desviaciones más significativas respecto a esta tendencia general sólo se presentan en las capas superficiales, donde la absorción de radiación solar ocasiona variaciones locales de la temperatura. El estado homogéneo característico de estos meses no es único, sino que en las cuatro campañas realizadas en este periodo de tiempo se ha registrado un conjunto de diferentes estados homogéneos, caracterizados por temperaturas cada vez más bajas a medida que el periodo de enfriamiento avanza desde finales del verano hasta principios de la primavera.

La llegada de los meses de primavera y verano impulsa un grado creciente de la estratificación ocasionado por el aumento de la intensidad de la radiación solar y por el intercambio de calor sensible con la atmósfera. En un principio, estos efectos son poco significativos y la energía térmica depositada sobre las aguas superficiales se transfiere en profundidad por la acción del viento. Sin embargo, y a medida que la calefacción solar continua, las aguas superficiales se calientan y alcanzan temperaturas en las que los efectos de flotabilidad resisten la acción mezcladora ejercida por el viento y las capas superficiales acumulan gran parte de la energía térmica recibida por el embalse. Esta transformación puede observarse en los perfiles correspondientes a los meses de junio y julio.

Al final de este periodo de calefacción, la capa superficial alcanzó un espesor de unos 9 m, presentaba una temperatura máxima de 25 °C y estaba separada de las aguas profundas y frías, que constituyen la hipolimnion, por una termoclina definida por un salto térmico de varios grados. Las temperaturas medidas en las zonas profundas del embalse eran del orden de 9 °C.

Después de este periodo en el que la energía recibida por el embalse es importante, no sólo por la intensidad de la radiación solar, sino por el número de horas diarias de insolación, las pérdidas, fundamentalmente calor sensible y latente, exceden las entradas y el embalse empieza a enfriarse. El inicio del periodo de enfriamiento se hace más evidente en la capa superficial que es la que soporta el intercambio de calor con la atmósfera, como recoge la fig. 3.20, correspondiente a los perfiles medidos en el mes de octubre.

Las aguas superficiales más frías y densas descienden y la epilimnion experimenta un proceso de mezcla convectiva. A medida que la temperatura de la epilimnion decrece, la estabilidad térmica de la columna de agua del embalse disminuye y la termoclina comienza a descender y en los perfiles medidos en el mes de octubre se localiza ya a 15,75 m por debajo de la superficie.

Las campañas realizadas entre mediados de octubre y fin de año muestran una destrucción progresiva del estado estratificado para alcanzar, finalmente, el estado de uniformidad vertical. A partir de este momento, el enfriamiento superficial continua debido a la evaporación y a la transferencia de calor sensible a la atmósfera, lo que ocasiona un enfriamiento global del embalse, hasta que la intensificación de la radiación solar inicia un nuevo ciclo. El proceso de transferencia de calor sensible está, en gran medida, favorecido por la condición de inestabilidad que representa el aire frío sobre un agua relativamente templada, lo que ocasiona notables efectos de convección en la capa límite atmosférica.

La comparación de los perfiles de la presa y el puente correspondientes a esta época han puesto de manifiesto que el cuerpo principal del embalse, debido a la profundidad total y a la gran masa de agua que almacena, presenta una mayor resistencia a la destrucción del estado estratificado que las zona alta e intermedia y muestra termoclinas más marcadas.

A lo largo del ciclo anual, la hipolimnion no experimenta variaciones apreciables de la temperatura. Este hecho se debe a que durante el periodo de calefacción está aislada de las influencias externas por la termoclina. La llegada de la etapa de mezclado vertical no incrementa de forma significativa su temperatura debido a que, para que se creen corrientes convectivas, el agua de la epilimnion ha de haberse enfriado previamente, por lo que cuando se produce la homogeneización ésta ha perdido gran parte del calor acumulado en el verano.

El seguimiento realizado al ciclo térmico del embalse de Entrepeñas ha puesto de manifiesto un comportamiento del tipo de *lagos cálidos monomícticos* según la clasificación introducida por Hutchinson y Löffler, 1956. Los lagos y embalses pertenecientes a esta clase no presentan temperaturas inferiores a 4 °C en ningún momento del ciclo, circulan libremente en invierno a 4 °C o más y se estratifican en verano.

2.2.4. Embalse de Bolarque

La experimentación realizada en el embalse de Bolarque ha incluido un total de 4 campañas de caracterización horizontal. Las fechas en que se realizaron las campañas se muestran en la tabla 3.5 y las figuras 3.21 y 3.22 muestra un plano del embalse.



Figura 3.21. Ubicación de los puntos de medida en la zona alta del embalse de Bolarque.

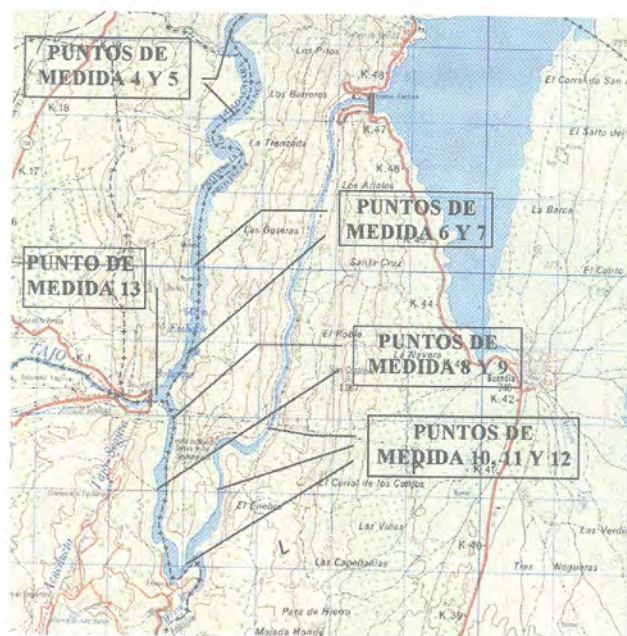


Figura 3.22. Ubicación de los puntos de medida en la zona baja del embalse de Bolarque.

a) Análisis de los perfiles de temperatura y conductividad eléctrica medidos en campañas verticales

Las campañas de caracterización vertical realizadas desde la presa del embalse de Bolarque han presentado perfiles de conductividad complejos, que pueden ser explicados adecuadamente si se tienen en cuenta un conjunto de circunstancias especiales que concurren en este embalse.

- El embalse de Bolarque recibe las aportaciones de dos tramos de río de flujo regulado, los ríos Tajo y Guadiela, aguas arriba de los cuales se encuentran dos embalses con agua de características muy dispares, los embalses de Entrepeñas y Buendía. El embalse de Buendía tiene un tiempo de residencia muy superior al de Entrepeñas (2,38 años) y almacena aguas de salinidad más alta. Un perfil conductivimétrico realizado desde la coronación de la presa en el día 27 de febrero de 1998, arrojó conductividades comprendidas entre $900 \mu\text{S cm}^{-1}$ en la superficie y $1.200 \mu\text{S cm}^{-1}$ en profundidad. Mientras que la conductividad del agua en la salida del embalse de Entrepeñas es de alrededor de $525 \mu\text{S cm}^{-1}$.
- En la presa del embalse de Bolarque hay emplazadas dos centrales hidráulicas, la central Bolarque I, situada en la margen derecha, y la central reversible Bolarque II, situada en la margen izquierda. La primera de ellas tiene como misión la producción de energía y mantener el caudal ecológico en el río Tajo. La central reversible tiene dos modos de operación: bombear agua al embalse de La Bujeda para alimentar el transvase Tajo-Segura o bajar agua procedente de este mismo embalse para producir energía hidroeléctrica. La operación de esta central está condicionada por las necesidades de agua para el transvase y por la demanda de energía eléctrica, por lo que es frecuente que cambie su modo de operación con cierta frecuencia. El funcionamiento de ambas centrales, sobre todo la central reversible, somete a una intensa agitación a la masa de agua próxima a la presa. Esta agitación produce la mezcla de las aguas procedentes de los embalses de Entrepeñas y Buendía, dando lugar a los perfiles de conductividad que se han medido en las campañas verticales.
- Las tuberías forzadas que conducen el agua a las bombas-turbinas de las centrales se abren en la presa a una profundidad de 9,5 m bajo el nivel de máxima capacidad de embalse. La lámina de agua a la que esta agitación afecta de forma más intensa es a la capa superficial, situada sobre esta cota, y a la capa de agua situada justo bajo esta localización.

Los perfiles de conductividad medidos en el embalse de Bolarque evidencian la mezcla de aguas de muy diferentes características, las procedentes de los embalses de Entrepeñas y Buendía. El mezclado de ambos tipos de aguas puede seguir-

se, en profundidad, atendiendo a los valores de conductividad medidos. En realidad no se ha encontrado ningún punto de muestreo en el que el agua presentara las características propias del embalse de Entrepeñas, sino que todos los perfiles, en mayor o menor grado, evidenciaban mezcla, a excepción del punto más próximo a la presa de Buendia, donde el agua presentaba propiedades típicas de este embalse. Entre la presa de Entrepeñas y el primero de los puntos de muestreo se registran dos aportes de agua al embalse de Bolarque, los arroyos de Valdefuentes y de Valdepaldeciano, sin embargo, no son suficientes como para ocasionar un tránsito en la conductividad como el existente entre el agua embalsada en Entrepeñas y el primer punto de muestreo.

Para mostrar este tipo de comportamiento se presentan los perfiles medidos en la campaña de campo realizada el día 13 de julio de 1998, figuras 3.23 y 3.24.

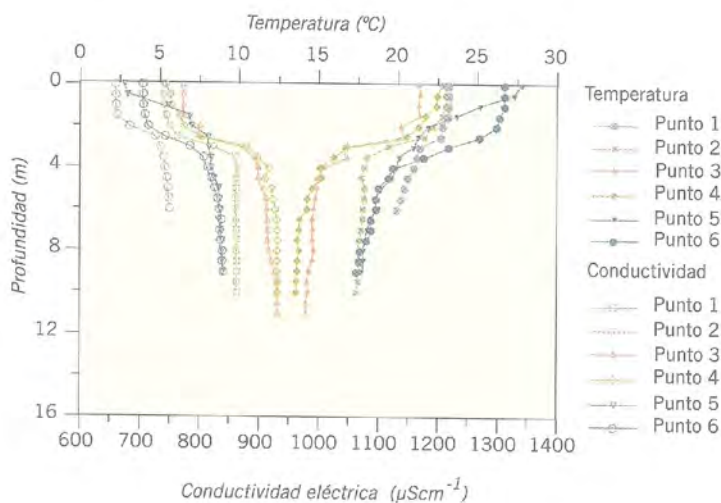


Figura 3.23. Perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica en el embalse de Bolarque. Campaña: 13/7/98.

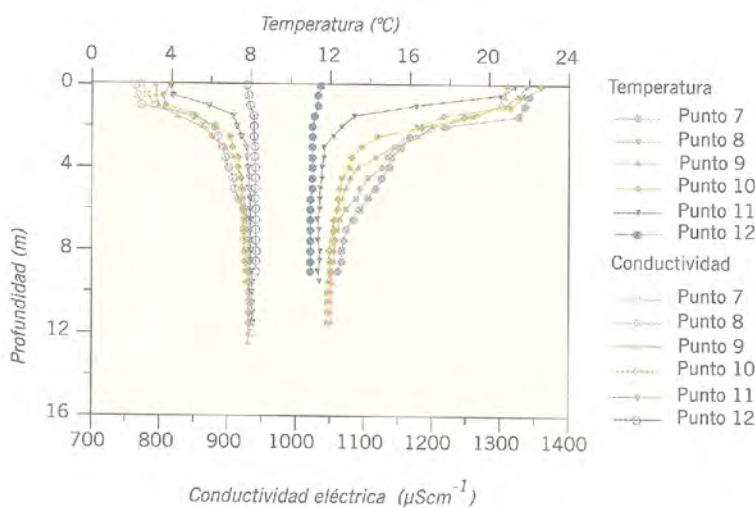


Figura 3.24. Perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica en el embalse de Bolarque. Campaña: 13/7/98.

Los perfiles de conductividad medidos en los diferentes puntos de muestreo han permitido definir las siguientes zonas en el embalse de Bolarque.

- La primera zona cubre las localizaciones de los puntos 1 y 2, figura 3.23, los dos más cercanos a la descarga del embalse de Entrepeñas. La conductividad del agua permite diferenciar tres capas, una superficial de entre 1,5 y 2,5 m de espesor, una intermedia de un metro de espesor, en la que se produce una rápida transición entre los valores de conductividad superficiales y los de fondo, y otra capa profunda en la que la conductividad permanece constante. Las conductividades medidas ($659 - 860 \mu\text{S cm}^{-1}$) son siempre superiores a los valores típicos de Entrepeñas ($500 - 535 \mu\text{S cm}^{-1}$) e inferiores a los de Buendía ($930 - 940 \mu\text{S cm}^{-1}$). El perfil de temperatura medido en el punto 1 presenta un progresivo decremento desde la superficie ($23,2 \text{ }^\circ\text{C}$) hasta el fondo ($19,9 \text{ }^\circ\text{C}$) con un gradiente térmico medio de $0,55 \text{ }^\circ\text{C m}^{-1}$ y un pequeño salto entre los 2,5 y 3 m de profundidad. En el punto 2, la estratificación se hace más evidente y la temperatura sigue una tendencia similar a la conductividad.
- El segundo grupo lo constituyen los puntos 3 a 6, figura. 3.23, todos ellos situados en el primitivo cauce del río Tajo. Los perfiles de conductividad permiten diferenciar tres capas. Una capa superficial de hasta 2,5 m de espesor, donde la conductividad aumenta con la profundidad entre 740 y $780 \mu\text{S cm}^{-1}$. Estos valores son ligeramente superiores a los medidos en los dos primeros puntos de muestreo, lo que indica un aumento de la proporción relativa de agua procedente del río Guadiela. Una capa intermedia, de 1,5 m de espesor, en la que se localiza la mayor parte del incremento de conductividad que se detecta entre la superficie y el fondo, con un gradiente conductivimétrico medio de $100 \mu\text{S cm}^{-1} \text{ m}^{-1}$. Los valores finales de conductividad se sitúan entorno a $917 \mu\text{S cm}^{-1}$. Una capa profunda, que abarca desde 3,5 hasta 4 m de profundidad y hasta la cota de fondo, en la que el agua procede mayoritariamente del embalse de Buendía, como evidencian valores de conductividad iguales a los medidos en los puntos más próximos a la descarga de este embalse ($930 - 940 \mu\text{S cm}^{-1}$). Los perfiles de temperatura de estos puntos definen de igual modo estas tres mismas capas y con espesores muy similares.
- El tercer grupo incluye desde el punto 7 al 12, figura 3.24. Todos ellos ponen de manifiesto mezcla de agua de los embalses de Entrepeñas y Buendía, aunque con una contribución mucho más importante de éste último. De las tres capas de agua que podían definirse en los puntos anteriores, la primera ha quedado reducida a la mínima expre-

sión y presenta un espesor comprendido entre 0,5 y 1 m, con valores de conductividad elevados que varían entre 770 y 820 $\mu\text{S cm}^{-1}$. La lámina intermedia presenta una rápida transición entre los valores de conductividad superficiales y los medidos en profundidad, con espesores entre 1 y 3 m y gradientes verticales medios de 66 $\mu\text{S cm}^{-1} \text{ m}^{-1}$. El agua situada a profundidades mayores de 4 m, en todos los casos, presenta las características del embalse de Buendía. La temperatura muestra perfiles similares a los de conductividad. Aquellas localizaciones en las que se han realizado medidas en varios puntos de la sección transversal del embalse no han puesto de manifiesto diferencias significativas entre ambas márgenes.

- El último perfil de esta campaña, punto 12, figura 3.24, emplazado cerca del embalse de Buendía, mostró las características propias del agua de este embalse con conductividades elevadas (928 - 941 $\mu\text{S cm}^{-1}$) y temperaturas bajas, que apenas varían entre la superficie y el fondo, con valores extremos respectivos de 11,0 °C y 11,5 °C. Estas temperaturas tan bajas para esta época del año evidencian que el agua llevaba poco tiempo sometida al intercambio de calor con la atmósfera.

b) Análisis de los perfiles longitudinales de temperatura y conductividad eléctrica.

Los cambios que muestra la conductividad en función de la distancia permiten comprobar la mezcla paulatina de las aguas procedentes de los embalses de Entrepeñas y Buendía. El cambio longitudinal de conductividad, que pone de manifiesto esta mezcla, es mayor en la capa superficial, de unos 2 m de espesor, que en las aguas subyacentes, figura 3.25.

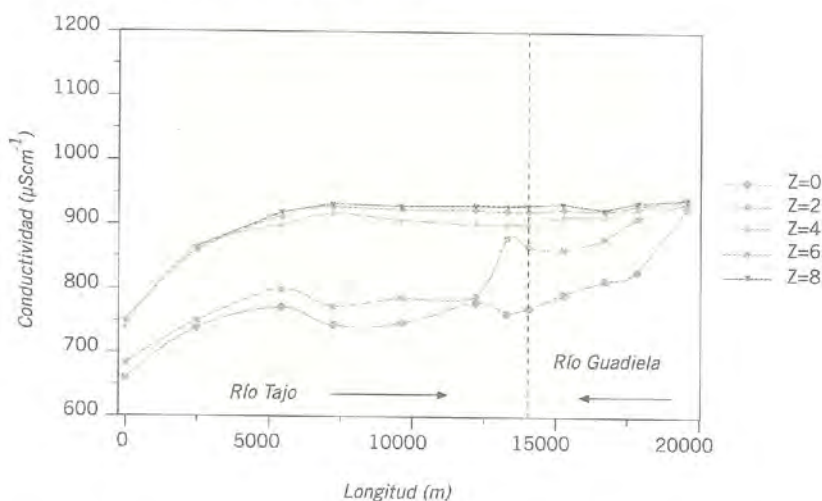
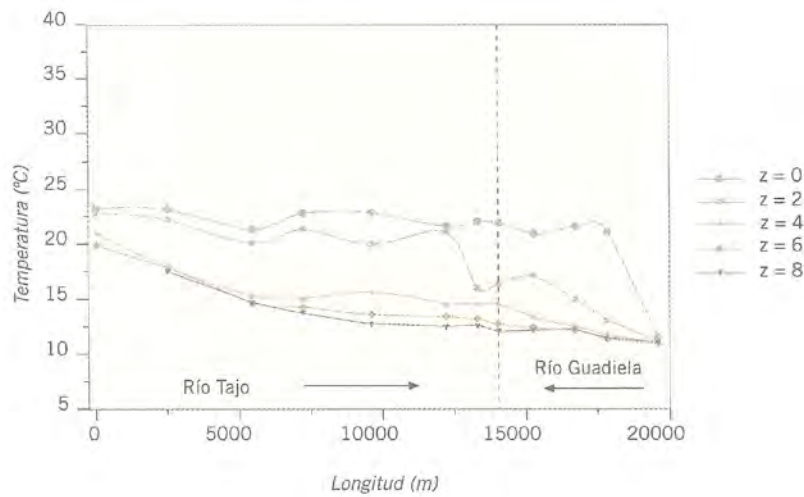


Figura 3.25. Perfiles longitudinales de conductividad eléctrica en el embalse de Bolarque. Campaña: 13/7/98.

La variación longitudinal de la temperatura del agua medida en esta campaña aparece recogida en la figura 3.26. La explicación de este perfil térmico longitudinal

está íntimamente relacionada con las características de la lámina de agua puestas de manifiesto por el perfil conductivimétrico, que ha mostrado diferencias verticales en la concentración salina del agua. Estas diferencias en la salinidad se traducen en gradientes verticales de la densidad del agua, que dificultan los procesos de mezcla.

Figura 3.26. Perfiles longitudinales de temperatura en el embalse de Bolarque. Campaña: 13/7/98.



c) Análisis de la evolución de la temperatura y conductividad eléctrica a lo largo del ciclo anual.

El embalse de Bolarque muestra perfiles térmicos homogéneos el periodo de tiempo comprendido entre los meses de noviembre y marzo. El estado homogéneo evoluciona a lo largo de estos meses desde perfiles de temperatura prácticamente constante, o que incluso muestran temperaturas superficiales más bajas que las medidas en profundidad, hasta el medido a mediados de marzo, que acusa el efecto de la radiación solar en una capa superficial de unos 6 m de espesor. Durante este periodo de tiempo, las variaciones longitudinales de la temperatura no son importantes, mientras que las variaciones verticales sólo se hacen apreciables en aquellos puntos a los que el agua llega después de estar sometida a los agentes externos durante un cierto periodo de tiempo.

Los perfiles correspondientes a los meses de abril y julio muestran un aumento de la temperatura ocasionado por el calentamiento de las aguas a causa del aumento de la intensidad de la radiación solar y del calor sensible intercambiado con la atmósfera, pero con dos particularidades:

- Las temperaturas del agua medidas en el mes de abril son muy bajas para esta época del año.
- El perfil correspondiente al mes de julio muestra una clara elevación superficial de la temperatura, pero no aparecen definidas las tres capas típicas de un embalse estratificado.

Esta estructura, por contra, si aparece claramente definida en los perfiles tomados el día 21 de septiembre, que presenta temperaturas superficiales más bajas que las registradas en el mes de julio.

La complejidad aparente del ciclo anual del embalse de Bolarque puede ser explicada adecuadamente si se tiene en cuenta dos factores:

- La posibilidad de que se desarrolle estratificación permanente en un embalse es función de las dimensiones geométricas del vaso y del flujo de agua que circula a su través. La presencia de una estratificación clara normalmente requiere que el aporte medio anual no supere en más de diez veces la máxima capacidad de embalse.
- El embalse de Bolarque se abastece de dos embalses cuyas aguas presentan propiedades químicas claramente diferenciadas.

El cálculo del tiempo de residencia medio del embalse de Bolarque ha proporcionado un valor de 8,2 días, esto es, el aporte medio anual equivale a 44,5 veces la máxima capacidad de embalse. En estas condiciones, el ciclo anual esperable en este embalse, aún siendo del tipo cálido monomítico, no debe presentar un periodo estratificado muy prolongado, como demuestran los perfiles térmicos medidos experimentalmente.

Por otro lado, las diferencias en la salinidad de las aguas de los embalses de Entrepeñas y Buendía pueden originar una barrera de densidad de naturaleza química (quimioclina), que dificulte el mezclado vertical. Este hecho, junto con la observación experimental de que los perfiles de temperatura y conductividad medidos en periodos cálidos presentan localizaciones coincidentes para la termoclina y la quimioclina ha llevado a postular que la barrera química dificulta la transmisión vertical del calor absorbido por la superficie del agua. Como consecuencia, la acción mezcladora del viento es menos efectiva y las aguas superficiales retienen el calor intercambiado con la atmósfera. La coincidencia en la localización de los tránsitos térmico y químico provoca la aparición de una picnoclina más marcada y estable que la debida a cualquiera de ellos por separado.

La posición del máximo gradiente de conductividades en la columna de agua es función de la operación de los dos embalses de cabecera, esto es, de los aportes relativos que cada uno de ellos tenga en el flujo global del embalse de Bolarque. Por otra parte, cuando mayor sea el flujo circulante menor es el tiempo disponible para la mezcla vertical en la columna de agua y los cambios de conductividad entre la superficie y el fondo son más marcados.

e) Profundidades de Secchi

Las Profundidades de Secchi medidas en el embalse de Bolarque oscilan

entre 3 y 7 m. Estos valores corresponden a aguas con alta penetrabilidad de la radiación solar.

El grado de transparencia de las aguas aumenta a medida que el punto de muestreo se aleja de los desagües de los embalses de Entrepeñas y Buendía, puntos en los que se produce una mayor agitación de las aguas por la disipación de la energía cinética asociadas a las descargas. Esta disponibilidad de energía produce un aumento del grado de turbulencia, que permite la resuspensión de sedimentos del fondo, con el consiguiente aumento del coeficiente de extinción de la luz. A medida que el agua se desplaza hacia la presa de Bolarque, el material en suspensión precipita de nuevo y ésta gana en transparencia.

2.2.5. Embalse de Zorita Hidráulica

La experimentación realizada en el embalse de Zorita Hidráulica ha incluido un total de tres campañas de caracterización horizontal. Las fechas en que se realizaron las campañas se muestran en la tabla 3.5 y la figura 3.27 muestra un plano del embalse.

Figura 3.27. Ubicación de los puntos de medida en la zona alta del embalse de Zorita Hidráulica.



a) Análisis de los perfiles de temperatura y conductividad eléctrica medidos en campañas verticales

Las campañas de caracterización horizontal en el embalse de Zorita Hidráulica han estado enfocadas a determinar la influencia del vertido térmico de la central nuclear José Cabrera en el desarrollo de la estratificación en este embalse, así como a zonificar longitudinalmente el embalse según el mayor o menor efecto de este vertido.

Los perfiles térmicos del embalse de Zorita Hidráulica han permitido definir tres zonas en el embalse en razón de la estratificación térmica que éstos ponen de manifiesto.

- La primera zona o zona alta contiene los tres puntos más próximos a la descarga del embalse de Bolarque, figura 3.28, presenta una profundidad máxima de 6,5 m y no registra indicios de estratificación térmica, sino una caída progresiva de la temperatura con la profundidad. El gradiente térmico entre la superficie y el fondo es máximo en el primer punto ($0,5\text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$) y mínimo en el tercero ($0,08\text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$), con temperaturas superficiales que varían entre $15,1$ y $16,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las conductividades medidas están contenidas en un estrecho intervalo de valores ($865 - 897\text{ }\mu\text{S cm}^{-1}$) y muestran una cierta tendencia a aumentar con la profundidad.
- La segunda zona o zona media abarca el tramo de embalse que engloba los puntos de muestreo 3 y 4, y en ésta se aprecia la transición entre las aguas no afectadas por el vertido térmico y aquellas en las que sus efectos se muestran con mayor claridad, figura 3.28.

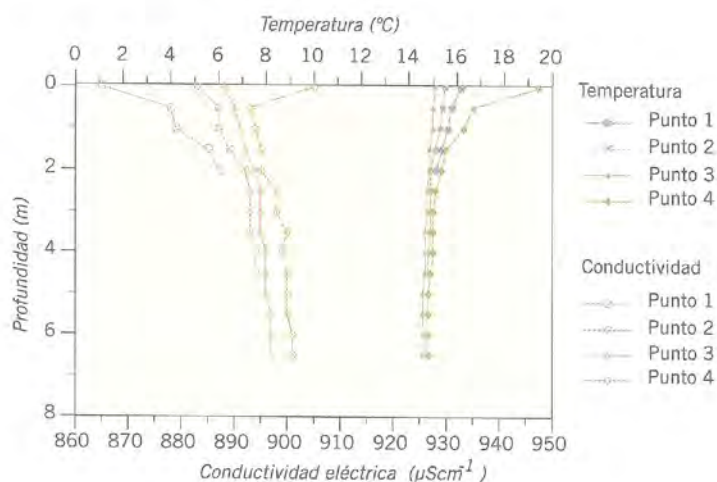
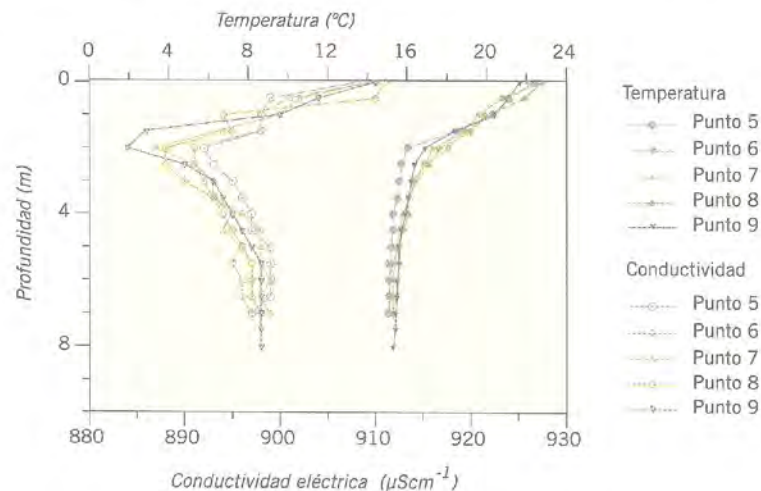


Figura 3.28. Perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica en el embalse de Zorita Hidráulica. Campaña: 16/7/98.

- La tercera zona o zona baja comprende desde el cuarto punto de muestreo hasta la presa, todos ellos situados aguas abajo de la descarga de la central nuclear José Cabrera. La influencia de la central puede detectarse aguas arriba de la descarga debido a que la diferencia de temperaturas entre ésta y el embalse se traduce en un efecto de flotabilidad y, como consecuencia, el vertido se lamina y extiende sobre la superficie del medio receptor, alcanzando localizaciones situadas aguas arriba. Al resto de puntos, el agua caliente llega por este mismo efecto al que se suma el desplazamiento global del agua (advección) hacia la central hidráulica del embalse, figura 3.29. En todos

estos puntos pueden definirse, atendiendo a los perfiles de temperatura, dos capas en la lámina de agua. La capa superficial, con un espesor comprendido entre 1,5 y 3 m, en la que el gradiente térmico es elevado y está comprendido entre 2,13 y 3,20 °C m⁻¹. Los valores de estos espesores y gradientes son función de la posición del punto de muestreo respecto a la descarga de la central, de modo que los espesores menores y los valores más altos de estos gradientes se localizan en los dos puntos más próximos a ésta, observándose una atenuación de los efectos del vertido con la distancia. Las temperaturas superficiales varían entre 19,4 y 22,7 °C. A profundidades mayores y hasta el fondo del embalse, las variaciones verticales de la temperatura son poco importantes, con valores finales comprendidos entre 14,8 – 15,3 °C, y del mismo orden que las registradas en los tres primeros puntos de muestreo, que no se veían sometidos a estratificación térmica.

Figura 3.29. Perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica en el embalse de Zorita Hidráulica. Campaña: 16/7/98.



Los perfiles de conductividad muestran valores ligeramente superiores en la superficie (910 $\mu\text{S cm}^{-1}$) que en el fondo (897 $\mu\text{S cm}^{-1}$).

b) Análisis de los perfiles longitudinales de temperatura y conductividad eléctrica.

La figura 3.30 recoge la variación longitudinal de la temperatura del embalse de Zorita Hidráulica medida el día 16 de julio de 1998, la representación se realiza para cinco profundidades distintas. Esta representación muestra, con mayor claridad que los perfiles puntuales, la alteración de la estructura térmica del embalse ocasionada por la operación de la central nuclear José Cabrera. El vertido, que se produce en las inmediaciones del quinto punto de muestreo, tiene menor densidad que el agua del embalse y flota sobre el medio, por lo que sus efectos son más fáciles de detectar en las medidas tomadas cerca de la superficie. Los puntos en los que los efectos térmicos se muestran con mayor claridad son los comprendidos entre el vertido (punto 5) y la presa.

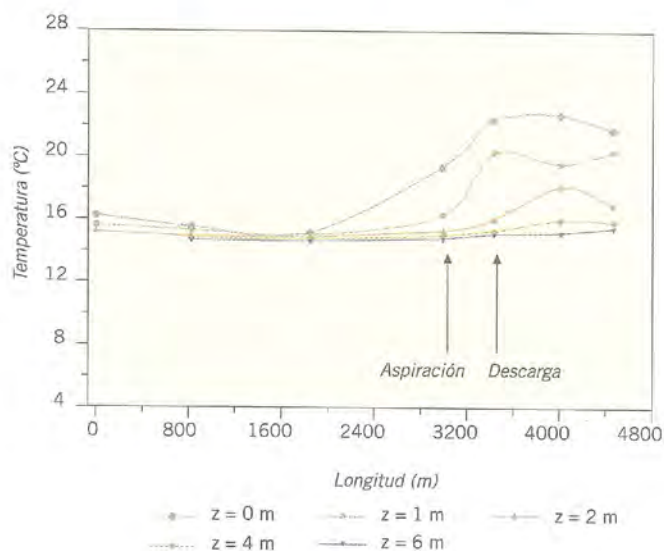


Figura 3.30. Perfiles longitudinales de temperatura en el embalse de Zorita Hidráulica. Campaña: 16/7/98.

Los cambios longitudinales de la conductividad muestran la práctica uniformidad que existe en todo el embalse, independientemente de la profundidad de la medida. Estos perfiles ponen de manifiesto dos aspectos destacables:

- El vertido ocasiona un ligero aumento de la conductividad superficial en aquellos puntos a los que afecta de forma directa.
- El agua del embalse de Zorita no presenta gradientes de conductividad similares a los del embalse de Bolarque debido al mezclado que se produce durante la turbinación en la central hidráulica Bolarque I.

c) Evaluación del ciclo anual

El estudio conjunto de las diferentes campañas experimentales realizadas en el embalse de Zorita Hidráulica ha puesto de manifiesto las siguientes características:

- El embalse se halla longitudinalmente segmentado a causa de la descarga del agua de refrigeración de la central nuclear José Cabrera.
- La zona libre de la influencia del vertido térmico no presenta estratificación, incluso en épocas en que ésta debería ser intensa si el embalse tuviera un tiempo de residencia mayor. Las temperaturas registradas en esta zona son muy similares a las medidas en la hipolimnion del embalse de Bolarque.
- La zona afectada por la operación de la central nuclear presenta una estratificación casi permanente con temperaturas anormalmente altas en invierno. Los perfiles de temperatura medidos en verano, por el contrario, muestran valores menores que otros embalses que no cuentan con contribuciones térmicas de origen artificial, tales como el embalse de Entrepeñas.

La explicación a estos hechos experimentales se encuentra en que el ciclo anual del embalse de Zorita Hidráulica es el resultado de la combinación de los efectos de los agentes externos con sus dos características propias más significativas: un bajo tiempo de residencia y el aporte de calor recibido de la central nuclear. El aporte medio anual supera en unas 537 veces la máxima capacidad del embalse, proporcionando un valor medio anual del tiempo de retención hidráulica de 16.3. En estas condiciones, resulta difícil que el embalse pueda desarrollar una estratificación permanente a causa de su intercambio de calor con la atmósfera.

En estas condiciones, el aporte de energía procedente de la central es fundamental, de hecho, durante el invierno las temperaturas siguen más la operación de la central que las variaciones de la radiación solar, como han demostrado las campañas realizadas entre los meses de noviembre y abril, en los que el embalse debería haber presentado un estado homogéneo. Las temperaturas registradas presentan variaciones que no pueden explicarse en función de los intercambios de calor con la atmósfera. Dentro de esta colección de estados, se alternan los perfiles prácticamente isotermos, como el medido durante el mes de enero en el que la central estaba en operación de recarga, con otros en los que aparece una cierta estratificación, como los dos correspondientes al mes de febrero. La profundidad a la que se localiza la termoclina varía con el tiempo.

Durante los meses de mayo a octubre, la intensidad de la radiación solar aumenta y la temperatura media de la atmósfera es más elevada, favoreciendo la calefacción de la masa de agua. De los perfiles englobados en este periodo, sólo los correspondientes a los meses de mayo y octubre presentan una capa superficial más o menos homogénea separada de las aguas más profundas por una termoclina; las restantes medidas muestran una capa superficial estable, donde la densidad evoluciona de forma progresiva con la profundidad y una capa más profunda, localizada a partir de los 2 o 3 m, donde la temperatura se mantiene uniforme. La razón para que en la época estival no se alcancen temperaturas tan altas como en otros embalses de mayor tiempo de residencia, como Entrepeñas, se debe a la competencia entre fuentes energéticas. Así, mientras las aguas de Zorita Hidráulica reciben un aporte energético intenso procedente de la central nuclear, el intercambio con la atmósfera es poco significativo debido al bajo tiempo de residencia del embalse. El embalse de Entrepeñas, por el contrario, está sometido a un proceso de calefacción mucho más lento, pero que se prolonga durante un periodo de tiempo considerable y acaba siendo más efectivo.

2.2.6. Embalse de Almoguera

El embalse de Almoguera es un embalse de pequeño tamaño, poca profundidad y un tiempo de residencia muy bajo. Estas características hacen que sea un embalse de dinámica muy simple que hace que el embalse presente homogeneidad vertical en toda su masa de agua a lo largo de todo el ciclo anual. Los valores

de la temperatura y conductividad eléctrica de la masa de agua están determinados por las características del agua que aporta al embalse el de Zorita Hidráulica. Debido a ello no se va a realizar una descripción más detallada de los resultados obtenidos en las campañas realizadas en este embalse.

2.2.7. Embalse de Estremera

Igual que el embalse de Almoguera, el embalse de Estremera es un embalse de pequeño tamaño, poca profundidad y un tiempo de residencia muy bajo. Estas características hacen que sea un embalse de dinámica muy simple que hace que el embalse presente homogeneidad vertical en toda su masa de agua a lo largo de todo el ciclo anual. Los valores de la temperatura y conductividad eléctrica de la masa de agua están determinados por las características del agua que aporta al embalse el de Almoguera. Debido a ello no se va a realizar una descripción más detallada de los resultados obtenidos en las campañas realizadas en este embalse.

2.2.8. Embalse de Arrocampo

La experimentación realizada en el embalse de Arrocampo ha incluido un total de 6 campañas. En la tabla 3.5 se recogen la fecha en que se realizaron dichas campañas y en la figura 3.31 se muestra un plano del embalse donde se ubican los puntos de medida.



Figura 3.31. Ubicación de los puntos de medida en el embalse de Arrocampo.

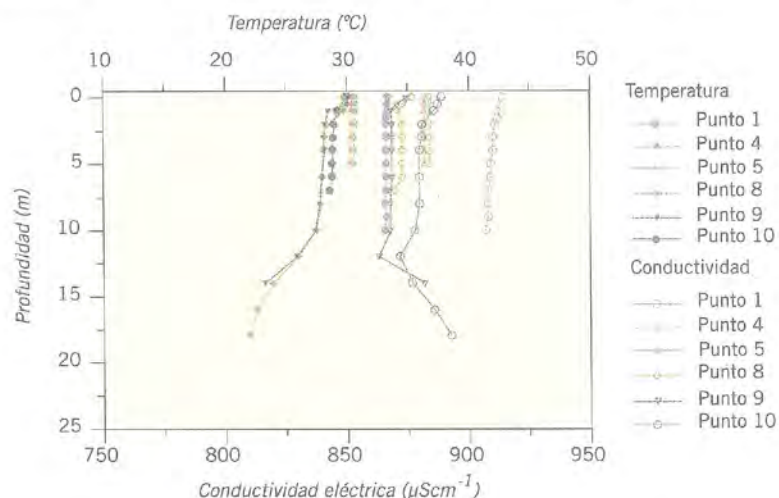
En cada una de las campañas se han realizado medidas en un número de puntos que oscila entre 8 y 10, los puntos se distribuyen a lo largo del embalse.

El embalse de Arrocampo es un embalse cuya lámina de agua presenta una estructura muy uniforme a lo largo del ciclo anual, ya que la pequeña profundidad del embalse y su bajo tiempo de residencia, 9,34 d, hacen que su comportamiento esté controlado por la operación de la central nuclear. Por lo que, en operación normal de la central nuclear, las conclusiones acerca de los perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica que se extraen de una de las campañas son muy semejantes a las conclusiones del resto de campañas.

a) Análisis de los perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica.

Los perfiles verticales de temperatura y conductividad térmica medidos en todos los puntos del embalse presentan una estructura muy semejante de la lámina de agua, figura 3.32. Una excepción a este comportamiento la presentan los puntos, ubicados en puntos situados en la zona del embalse de mayor profundidad que es la más próxima a la presa, puntos 9 y 10 en la figura 3.32.

Figura 3.32.
Perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica en el embalse de Arrocampo.
Campaña: 14/05/02.



En la zona más próxima a la presa, la temperatura disminuye con la profundidad en los primeros metros, por debajo de esta capa se extiende una capa homogénea que presenta constancia de temperatura y conductividad eléctrica hasta una profundidad de 10 m, para profundidades mayores la temperatura disminuye y la conductividad aumenta con la profundidad. El gradiente de temperatura de la capa superior se debe al intercambio de calor con el ambiente, que en este embalse es alto debido a la alta temperatura que presenta el agua que es descargada por la central nuclear. Los gradientes verticales de temperatura y conductividad de la capa más profunda de la lámina de agua tienen su origen en la acumulación que se produce en esta parte del embalse ocasionada por la descarga en superficie con que opera el embalse.

Salvo en la zona comentada en el párrafo anterior, los perfiles de temperatura y conductividad manifiestan la alta homogeneidad de la lámina de agua del embalse.

b) Análisis de los perfiles longitudinales de temperatura y conductividad eléctrica.

La figura 3.33 muestra los perfiles longitudinales de temperatura medidos en el embalse.

En los perfiles de temperatura se observa como la temperatura del agua disminuye en su recorrido a lo largo del embalse debido al intercambio de calor con el ambiente, siendo este más eficaz en los primeros 4.000 m del recorrido.

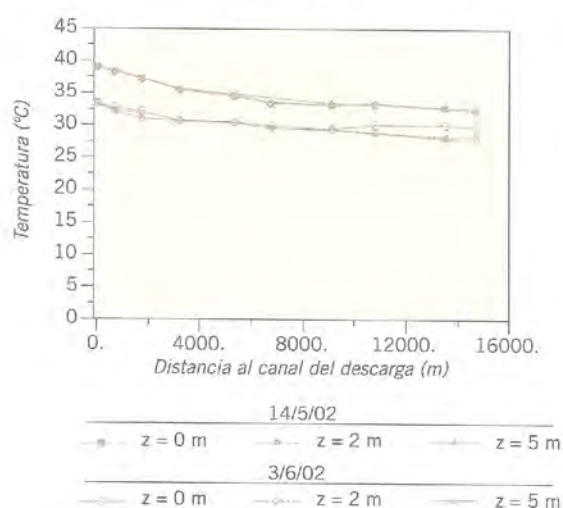


Figura 3.33. Perfiles longitudinales de temperatura en el embalse de Arrocampo.

En la figura 3.33 se ha incluido el perfil longitudinal de la campaña realizada el día 14 de mayo de 2002 para mostrar la influencia de la operación de la central nuclear en el estado del embalse. En los días anteriores a la realización de la campaña, en la central nuclear de Almaraz se llevó a cabo la operación de arranque de la unidad número uno de dicha central nuclear. Esta operación condicionó la estructura de la lámina de agua del embalse. Las medidas realizadas indican que en el embalse se pueden diferenciar dos zonas. La primera abarca desde el canal de descarga de la central nuclear hasta el punto de medida situado 9.100 m de distancia de dicho canal. En esta zona la masa de agua del embalse presenta perfiles verticales de temperatura planos, semejantes a los medidos en el resto de campañas. La segunda zona se extiende desde el final de la zona anterior hasta la presa del embalse. Los perfiles medidos en esta zona están definidos por el frente de agua más caliente que ha originado el arranque de la unidad número uno de la central nuclear. El efecto del frente se aprecia si se comparan los perfiles longitudinales de las dos campañas, recogidos en la figura 3.33. Durante la realización de la campaña de 3 de junio, la central se encontraba en operación normal y la

lámina de agua del embalse presenta homogeneidad vertical. Mientras que en el día 14 de mayo, para distancias al canal de descarga superiores a 9,100 m, se ha perdido la homogeneidad vertical. La capa más superficial, de 2 m de profundidad, es homogénea, y debajo de ella se origina una termoclina de $4\text{ }^{\circ}\text{C m}^{-1}$ provocada por el frente de agua más caliente que proviene del arranque de la unidad número uno. Por debajo de la termoclina la estructura de la lámina de agua vuelve a ser la misma que en las demás campañas.

La conductividad eléctrica se mantiene prácticamente constante a lo largo del embalse, salvo en la zona de acumulación próxima a la presa.

c) Análisis de la evolución de la temperatura y conductividad eléctrica a lo largo del ciclo anual.

La temperatura disminuye durante el final del otoño e invierno y aumenta a lo largo de la primavera y el verano. Sin embargo, debido a las características del embalse, el agua que circula por él es agua caliente que proviene del condensador de la central nuclear, las máximas diferencias de temperatura a lo largo del ciclo anual son bajas, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la descarga y en la presa, respectivamente, si se las compara con las medidas en otros embalses, por ejemplo en Estremera se han medido diferencias de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La conductividad eléctrica del agua aumenta durante el otoño e invierno y disminuye en primavera. Este comportamiento es diferente al observado en otros embalses. Esta forma anómala de la evolución de la conductividad a lo largo del ciclo anual puede ser debida a la forma de operar del embalse. El embalse de Arrocampo se puede considerar dividido en dos subembalses, que aquí denominaremos embalses: caliente y frío. En el embalse caliente se descarga el agua de refrigeración de los condensadores de la central nuclear y es en el que se han realizado las medidas de temperatura y conductividad. El embalse frío es desde el que se suministra el agua a los condensadores de la central nuclear. Cuando la temperatura del agua en el embalse caliente es inferior a una determinada temperatura, el agua de este embalse se recircula hacia el embalse frío. Si la temperatura es superior a la establecida, parte del agua se recircula al embalse frío y parte se descarga al embalse de Torrejón-Tajo y se toma la misma cantidad de agua descargada desde el embalse de Torrejón-Tajo. Durante el invierno, la temperatura en el embalse caliente es inferior a la establecida, por lo que el agua de este embalse es recirculada hacia el embalse frío. Esta recirculación puede arrastrar agua de la zona de acumulación próxima a la presa que originaría el aumento de conductividad en todo el embalse.

d) Análisis de la evolución de la Profundidad de Secchi

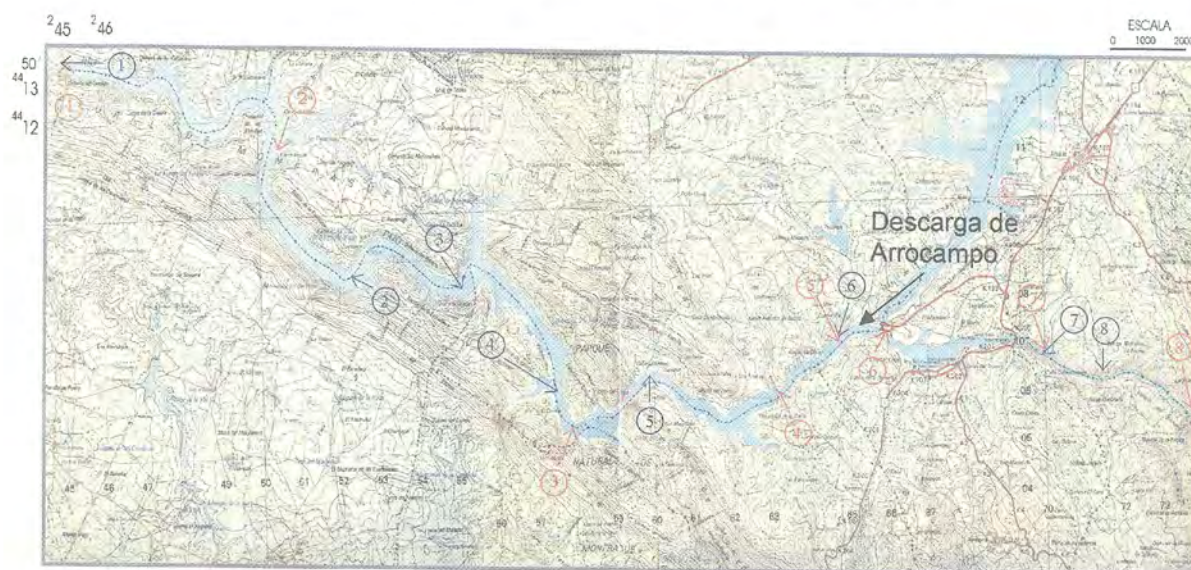
La profundidad de Secchi oscila entre 0.6 y 0.9 m, valores que corresponden a muy bajos valores de transparencia del agua a la radiación solar. Dada la subjetivi-

dad del método de medida de este parámetro, el valor de la Profundidad de Secchi medida en todas las campañas y en todos los puntos de medida se puede considerar constante en el tiempo y en la distancia a la descarga de la central nuclear.

2.2.9. Embalse de Torrejón-Tajo

La experimentación realizada en el embalse de Torrejón-Tajo ha incluido un total de 6 campañas de caracterización horizontal. En la tabla 3.5 se recogen la fecha en que se realizaron dichas campañas y en la figura 3.34 se muestra un mapa del embalse.

En cada una de las campañas se han realizado medidas en un número de puntos que oscila entre 8 y 11, estos puntos se distribuyen a lo largo del embalse. En la zona alta del embalse se han realizado medidas hasta que la morfología del vaso del embalse y su vegetación acuática permitían el desplazamiento de la embarcación.



a) Análisis de los perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica.

Los perfiles de temperatura y conductividad medidos en el embalse de Torrejón-Tajo ponen de manifiesto que se trata de un embalse que presenta una dinámica compleja. Se trata de perfiles sin una estructura bien definida y muy variables en el espacio y en el tiempo.

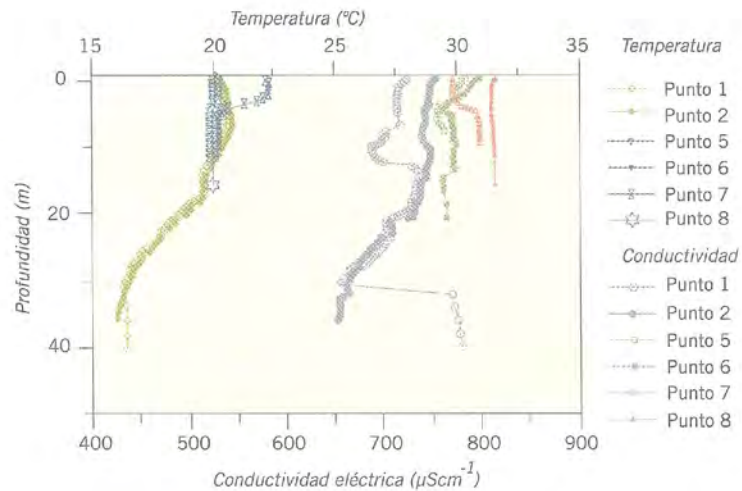
La complejidad de la estructura de la lámina de agua del embalse se debe a que ésta se ve afectada por la descarga del embalse de Arrocampo y por la operación de las centrales hidroeléctricas de Valdecañas y de Torrejón-Tajo.

El embalse de Torrejón-Tajo es un embalse en el que, por el volumen de agua embalsada (capacidad media 156,964 hm³) y profundidad (máxima profundidad en la zona de la presa de 50 m y profundidad media de las zonas alta y media de 32 m), debería esperarse estratificación natural. La presencia de la termoclina natural está

Figura 3.34. Ubicación de los puntos de medida en el embalse de Torrejón-Tajo.

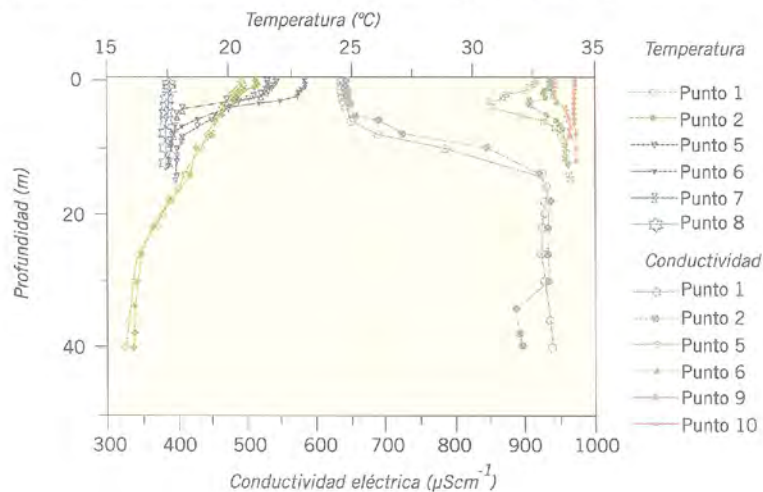
condicionada por la operación de la central hidroeléctrica instalada al pie de su presa. Por ejemplo, en la figura 3.35, los perfiles de los puntos 1 y 2, puntos más próximos a la presa del embalse, presentan un pequeño gradiente de temperatura para profundidades superiores a 20 m. Estos gradientes corresponden a una termoclina natural que no ha llegado a desarrollarse totalmente por efecto de la turbinación de la central hidroeléctrica.

Figura 3.35. Perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica en el embalse de Torrejón-Tajo. Campaña: 27/09/01.



La central hidroeléctrica de Torrejón-Tajo es reversible y permite bombear agua desde el embalse de Torrejón-Tietar hacia el de Torrejón-Tajo. La influencia de este bombeo en la estructura de la lámina de agua del embalse es importante, debido a la diferente salinidad y temperatura del agua contenida en ambos embalses. Este efecto se aprecia en los perfiles de conductividad medidos en los puntos 1 y 2 durante la campaña realizada el día 30 de mayo de 2002, figura 3.36. La lámina de agua se encuentra fragmentada por una picnoclina originada por la diferencia de densidad del agua que proviene del embalse de Torrejón-Tietar, capa superior, y la contenida en el embalse de Torrejón-Tajo, capa inferior.

Figura 3.36. Perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica en el embalse de Torrejón-Tajo. Campaña: 30/05/02.



El agua descargada desde el embalse de Arrocampo presenta menor salinidad y mayor temperatura que el agua contenida en el embalse de Torrejón-Tajo, por lo que presenta menor densidad. Debido a esta menor densidad el agua de la descarga de Arrocampo flota sobre la contenida en el embalse de Torrejón-Tajo aguas arriba y aguas abajo de su avenamiento. Esta influencia se aprecia en los perfiles medidos en los puntos 7 y 8 en la campaña realizada el día 27 de septiembre de 2001, figura 3.35 y en los perfiles medidos en los puntos 9 y 10 durante la campaña realizada el día 30 de mayo de 2002, figura 3.36. La longitud de la zona afectada por la descarga aguas arriba de su avenamiento depende de la operación del embalse de Arrocampo y de la central hidroeléctrica de Valdecañas.

En el avenamiento de la descarga de Arrocampo, punto 6 en figuras 3.35 y 3.36, se aprecia una termoclina artificial originada por la menor densidad del agua descargada. Esta termoclina se debilita aguas abajo de dicho avenamiento, punto 5 en figuras 3.35 y 3.36. La termoclina artificial desaparece cuando cesa la operación de descarga del embalse de Arrocampo.

b) Análisis de los perfiles longitudinales de temperatura y conductividad eléctrica.

En los perfiles longitudinales de temperatura, figura 3.37, se aprecia claramente el aumento de esta variables que se produce en las capas más superficiales de agua debido a la descarga del embalse de Arrocampo. La temperatura de estas capas superficiales de agua disminuye aguas arriba y aguas abajo del avenamiento de la descarga.

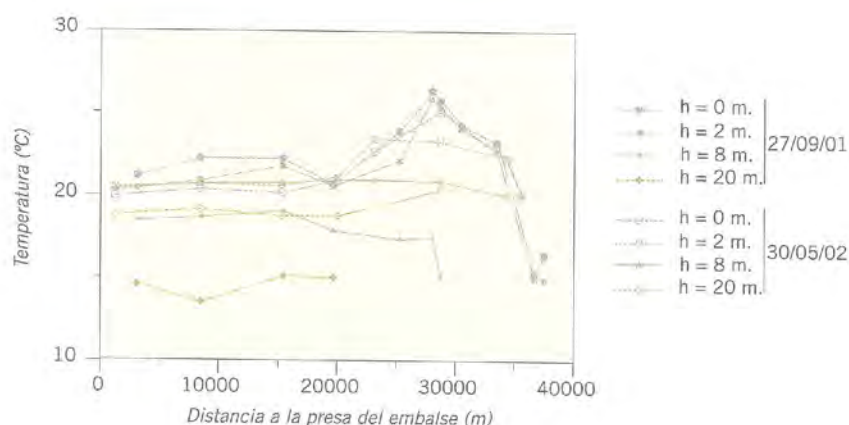
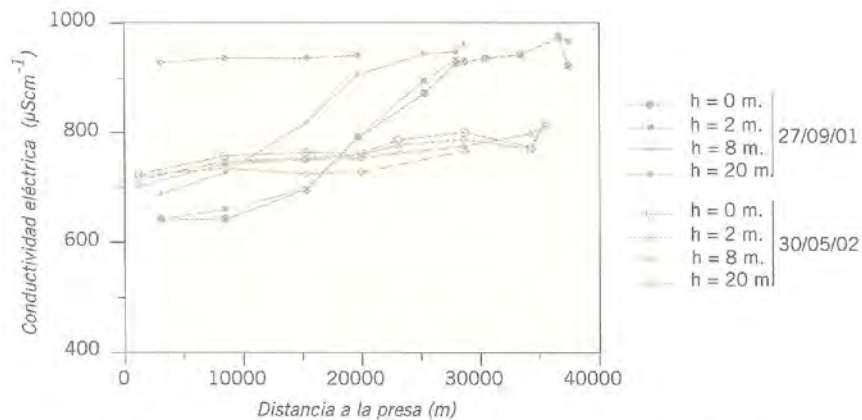


Figura 3.37. Perfiles longitudinales de temperatura en el embalse de Torrejón-Tajo.

Los perfiles longitudinales de conductividad eléctrica medidos el día 30 de mayo de 2002, figura 3.38, muestran el efecto de la operación de bombeo de agua del embalse de Torrejón-Tietar. La conductividad del agua que ocupa las capas superficiales es más baja que la medida en el agua de profundidad. El agua que

proviene del embalse de Torrejón-Tietar avena en el de Torrejón-Tajo mediante un canal de superficie y como su densidad es menor que la del agua que ocupa el embalse de Torrejón-Tajo, flota sobre ésta. A medida que el agua que ocupa la capa superior avanza por el embalse su conductividad aumenta debido a procesos de difusión vertical. De cualquier forma, este tipo de comportamiento está condicionado por las condiciones de operación del embalse en el momento de realizar las medidas experimentales y en tiempos anteriores, por lo que, este tipo de perfil no puede generalizarse. De hecho, entre los perfiles medidos en cada una de las campañas pueden existir grandes diferencias, compárense por ejemplo los perfiles que se muestran en la figura 3.38.

Figura 3.38. Perfiles longitudinales de conductividad eléctrica en el embalse de Torrejón-Tajo.



c) Análisis de la evolución de la temperatura y conductividad eléctrica a lo largo del ciclo anual.

Como es de esperar, la temperatura de la masa de agua contenida en el embalse disminuye durante el otoño y el invierno y aumenta durante la primavera y el verano. En las capas de agua más profundas la evolución de la temperatura con el tiempo, es parecida en cualquier zona del embalse y a cualquier profundidad. Sin embargo, en las capas más superficiales, la evolución de la temperatura en el ciclo anual depende de la zona del embalse considerada. En la parte alta del embalse, aguas arriba de la descarga del embalse de Arrocampo, el gradiente vertical de temperatura es muy pequeño en los primeros 2 m de profundidad. En las zonas próximas a la descarga y a la presa del embalse, el gradiente es pequeño durante el otoño, sin embargo durante el resto del año los gradientes verticales aumentan. Este tipo de comportamiento está relacionado con la penetrabilidad de la radiación solar en el agua. Los máximos gradientes verticales de temperatura coinciden con los valores máximos medidos para la Profundidad de Secchi.

La evolución temporal de la conductividad eléctrica del agua en la zona de la presa es la inversa de la evolución de esta propiedad en el resto de la lámina de agua del embalse. El diferente comportamiento que presenta la zona próxima a la

presa puede estar relacionada con el bombeo de agua desde el embalse de Torrejón-Tietar. El embalse de Torrejón-Tietar es un embalse de pequeña capacidad, 18 hm³. Su principal aporte es el río Tietar, cuya cuenca se encuentra en la sierra de Gredos. Durante la época de deshielo, primavera, el caudal del río Tietar aumenta considerablemente y se intensifica el bombeo desde el embalse de Torrejón-Tietar hacia el de Torrejón-Tajo con el fin de su aprovechamiento eléctrico y, también, para evitar desbordamientos. El aumento de caudal bombeado de agua de menor conductividad hace disminuir la conductividad del agua contenida en las proximidades de la presa del embalse de Torrejón-Tajo. Esta hipótesis queda corroborada por el hecho de que los valores de la conductividad de las aguas profundas del embalse en esta zona son iguales a los valores medidos en la cola del embalse y además su variación a lo largo del tiempo es la misma. Solamente el agua que proviene de Torrejón-Tietar, y queda flotando, es la que presenta una variación de conductividad eléctrica diferente a la del resto del agua del embalse.

En la zona de la descarga y de la cola del embalse la conductividad aumenta durante el otoño y el invierno y disminuye durante la primavera y el verano. Salvo en el otoño, las conductividades medidas en la zona de descarga son inferiores a las medidas en la cola del embalse.

d) Análisis de la evolución de la Profundidad de Secchi

Los valores de la Profundidad de Secchi oscilan entre valores de 0,25 y 3,4 m, dependiendo del punto de medida y de la campaña. No se puede establecer unas características generales en cuanto a la evolución de este parámetro con la distancia entre el punto de medida y la presa del embalse. Por lo que debe depender en gran medida de la operación de los embalses que se encuentran interconectados.

En la zona próxima a la presa la Profundidad de Secchi aumenta a lo largo del otoño e invierno y disminuye durante la primavera y el verano. Este tipo de evolución puede ser lógica si se piensa en la eutrofización que experimenta el agua de determinados embalses durante el verano. Además, también puede tener influencia el mayor caudal bombeado desde el embalse de Torrejón-Tietar que presenta mayor transparencia que el agua del Torrejón-Tajo. En el resto del embalse y salvo en la campaña realizada el día 25 de junio de 2002, en que la Profundidad de Secchi aumenta en la zona de descarga de Arrocampo, los valores de este parámetro son muy similares en el espacio y en el tiempo.

2.2.10. Embalse de Cortes II

La experimentación realizada en el embalse de Cortes II ha incluido un total de 6 campañas de caracterización horizontal. En la tabla 3.5 se recogen la fecha en que se realizaron dichas campañas y las figuras 3.39 y 3.40 muestran los planos del embalse.

Figura 3.39.
Ubicación de los puntos de medida en el embalse de Cortes II. Zona de Embarcaderos.

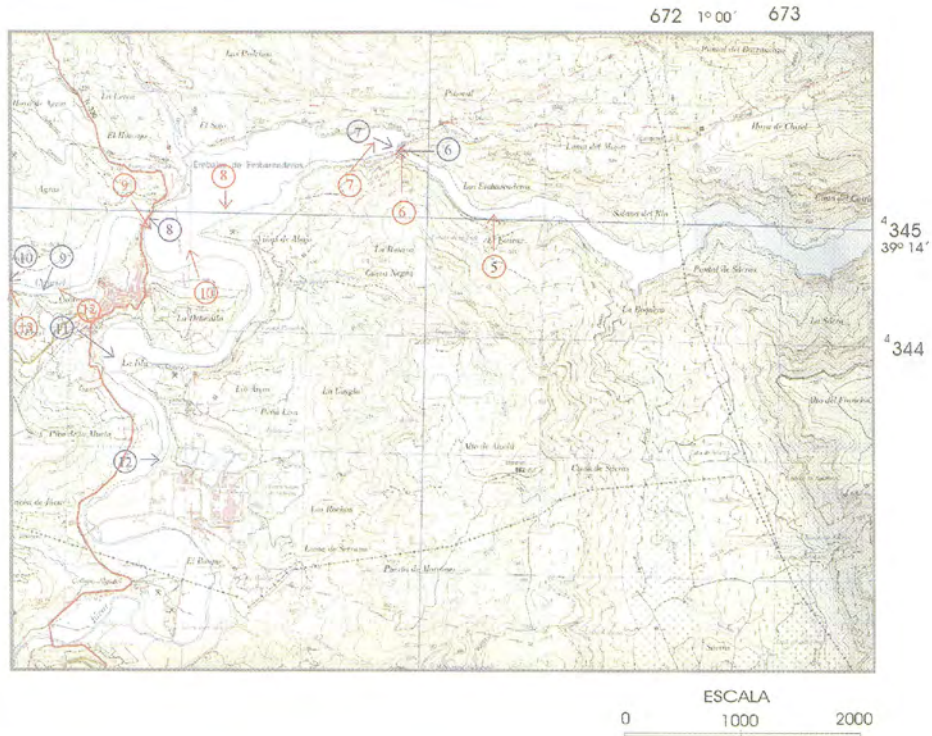
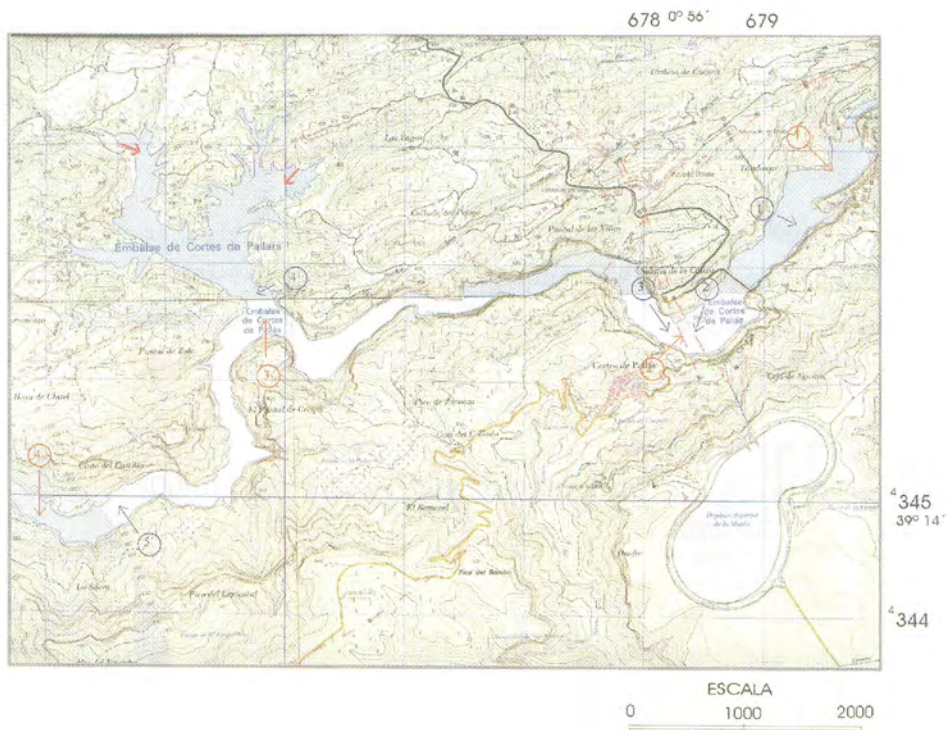


Figura 3.40.
Ubicación de los puntos de medida en el embalse de Cortes II. Zona intermedia y cuerpo principal del embalse.



En cada una de las campañas se han realizado medidas en un número de puntos que oscila entre 9 y 13, distribuyéndose estos puntos a lo largo del embalse. En la zona alta del embalse se han realizado medidas hasta que la morfología del vaso del embalse y su vegetación acuática permitían el desplazamiento de la embarcación. Sin embargo, en algunas de las campañas se realizaron medidas desde la orilla del río Júcar en puntos en los que no era posible el acceso en embarcación.

a) Análisis de los perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica.

Una conclusión del análisis conjunto de todas las campañas realizadas en el embalse de Cortes II es que los perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica se ven fuertemente influidos por la operación de las centrales hidroeléctricas instaladas aguas arriba o en el propio embalse y por la operación de la central nuclear de Cofrentes.

Para el análisis de resultados se va a considerar el embalse dividido en cinco zonas,

- Cuerpo principal.
- Zona comprendida entre el cuerpo principal y la antigua presa de Embarcaderos.
- Antiguo embalse de Embarcaderos.
- Antiguo cauce del río Gabriel.
- Antiguo cauce del río Júcar.

El vaso del cuerpo principal del embalse presenta máximas profundidades que oscilan entre 95 y 70 m y un tiempo medio de residencia de 54,91 d. Estas características del embalse hacen que sea esperable estratificación en esta parte del embalse. Así se comprueba en los perfiles verticales de temperatura y conductividad medidos durante la campaña realizada el día 2 de octubre de 2001, figura 3.41. La lámina de agua se encuentra claramente segmentada con la epilimnium, termoclina e hipolimnium claramente definidas. La situación contraria se observa en la campaña realizada el día 6 de marzo de 2002. En esta campaña la lámina de agua permanece uniforme hasta profundidades de más de 40 m, figura 3.42, para profundidades mayores se observan gradientes de temperatura y conductividad que no llegan a constituir una termoclina bien definida. Estos gradientes son un ejemplo de la influencia que ejerce la operación de la central hidroeléctrica de La Muela. El Depósito de La Muela es cerrado, por lo que solamente recibe los aportes del bombeo desde el embalse de Cortes II y el agua que contiene presenta mayor conductividad que el agua del embalse de Cortes II, debido a la acumulación salina que se produce por evaporación. Cuando este agua es turbinada hacia el embalse de Cortes II, y debido a su mayor densidad, se sumerge hasta el fondo y da lugar a un gradiente de conductividad y temperatura. Este mismo hecho se observa en todas las campañas realizadas.

Figura 3.41.
Perfiles verticales
de temperatura y
conductividad
eléctrica en el
embalse de Cortes
II. Campaña:
02/10/01.

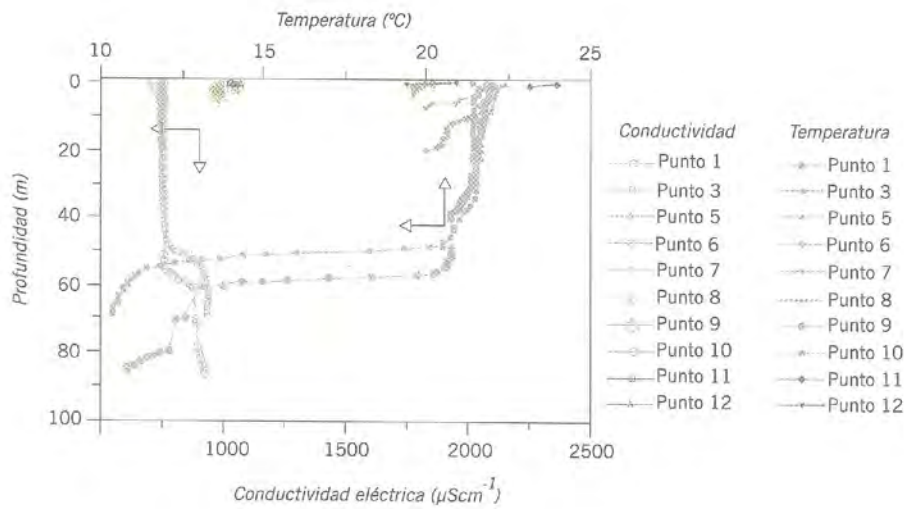
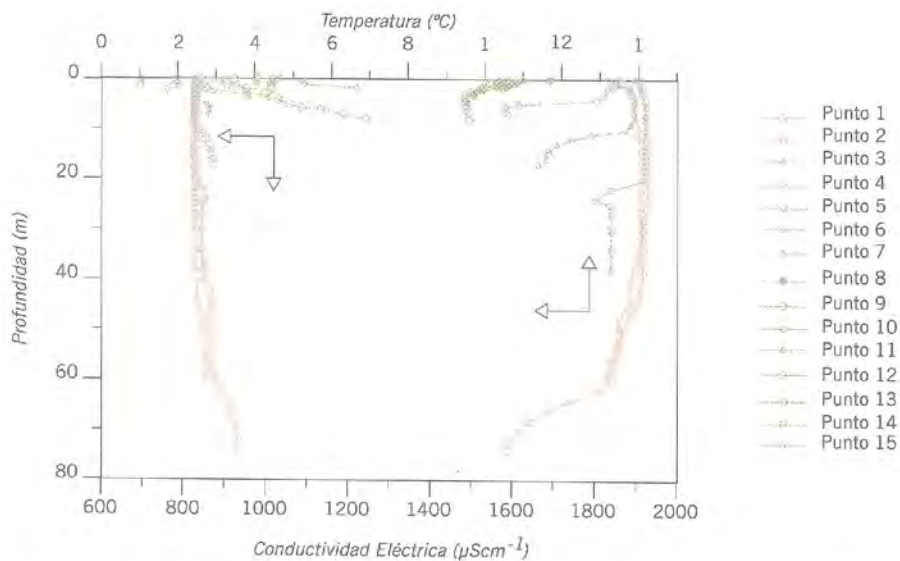


Figura 3.42.
Perfiles verticales
de temperatura y
conductividad
eléctrica en el
embalse de Cortes
II. Campaña:
06/03/02.



La zona comprendida entre el cuerpo principal y la antigua presa de Embarcaderos inunda el antiguo cauce del río Júcar y una llanura de su margen izquierda. Por lo que la morfología del embalse es encañonada, excepto en la zona de inundación de la llanura en la que la morfología del embalse tiene forma dendrítica. En esta parte del embalse, la profundidad disminuye con la distancia a la presa de Cortes II, la profundidad máxima varía desde 40 m en la zona próxima al cuerpo principal hasta 25 m en la zona próxima a la antigua presa de Embarcaderos. Los perfiles medidos evidencian que se trata de una zona de transición entre dos zonas muy diferentes del embalse y que se encuentra fuertemente afectada por la operación de las centrales instaladas aguas arriba. Por ejemplo, en la figura 3.42, puntos azules, se evidencia como esta zona es una zona de transición, la forma y magnitud de los perfiles de temperatura y conductividad son diferentes en cada uno de los puntos de medida.

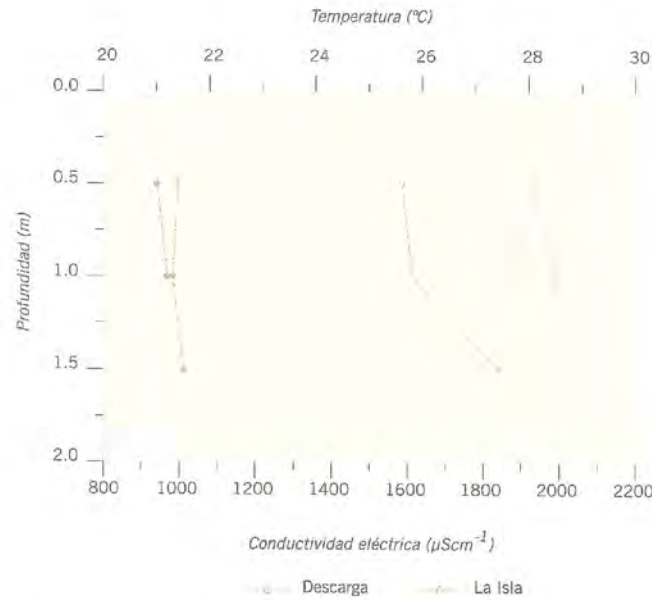
El antiguo embalse de Embarcaderos es una zona de poca profundidad, profundidad máxima de 9 m, en la que se mezclan dos corrientes de agua de muy diferente naturaleza. La corriente de agua que proviene de la turbinación del salto de Cofrentes, instalado en el río Cabriel y la corriente que proviene del río Júcar. Los perfiles medidos en esta zona son muy diferentes de una campaña a otra, figuras 3.41 y 3.42, puntos marrones, lo que evidencia un bajo grado de mezcla en esta zona del embalse y una gran dependencia de la estructura de la lámina de agua de las operaciones de la central hidroeléctrica de Cofrentes y de la central nuclear del mismo nombre.

La estructura de la lámina de agua que ocupa el antiguo cauce del río Cabriel está condicionada por la operación de la central hidroeléctrica de Cofrentes. Cuando esta central hidroeléctrica se encuentra en operación, el agua que ocupa el vaso del embalse se encuentra en circulación, los perfiles de temperatura y conductividad son planos y los valores medidos de la conductividad son inferiores a los medidos en el antiguo embalse de Embarcaderos. Cuando la central hidroeléctrica de Cofrentes no turбина, el agua del antiguo embalse de Embarcaderos inunda el antiguo cauce del río Cabriel y los valores de la conductividad medida son mayores que los medidos cuando esta central hidroeléctrica se encuentra en operación.

Los perfiles de temperatura y conductividad medidos en el agua que ocupa el antiguo cauce del río Júcar son muy diferentes de una a otra campaña, debido a su gran dependencia de la operación de descarga de la central nuclear de Cofrentes. La central nuclear de Cofrentes descarga agua que presenta mayor conductividad que la del agua que proviene del río Júcar. La descarga se realiza por tandas, con una frecuencia de alrededor de dos tandas por semana. En las figura 3.43 se muestran los perfiles verticales de temperatura y conductividad medidos durante la campaña realizada el día 19 de junio de 2001, en las proximidades de la descarga de la central nuclear y a la altura del paraje denominado La Isla, situado a 1.000 m del punto anterior. Los perfiles de temperatura son planos y ambos perfiles presentan valores de temperatura prácticamente iguales. Sin embargo, en los perfiles de conductividad se observa que la conductividad medida en la descarga es considerablemente mayor, en alrededor de $300 \mu\text{S cm}^{-1}$, que la medida en La Isla. Si se comparan estos perfiles con los medidos el día 2 de octubre de 2001, puntos 11 y 12 en figura 3.41, se observa que la conductividad más alta corresponde al punto 11, situado a la altura de La Isla, mientras que el situado enfrente de la descarga, punto 12, presenta menor conductividad. Una nueva situación se contempla en las medidas realizadas el día 6 de marzo de 2002, puntos 13, 14, y 15, en la figura 3.42. La conductividad medida en los tres puntos situados en el antiguo cauce del río Júcar son prácticamente iguales y la conductividad presenta un valor inferior a la medida en puntos situados aguas abajo. Este comportamiento solamente puede explicarse con la hipótesis de que el día 19 de junio de 2001, se realizaron las

medidas en un momento muy próximo a una descarga. En las campañas de los días 2 de octubre de 2001 y 6 de marzo de 2002, cuando se realizaron las medidas había transcurrido un tiempo entre la realización de las medidas y el momento en que se habían producido descargas. Durante este tiempo la mancha ha viajado a lo largo del embalse.

Figura 3.43. Perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica en el antiguo cauce del río Júcar. Campaña: 19/06/01.



b) Análisis de los perfiles longitudinales de temperatura y conductividad eléctrica.

En las figuras 3.44 y 3.45 se muestra la variación longitudinal de la temperatura y la conductividad eléctrica, respectivamente, en la campaña realizada el día 28 de noviembre de 2001. Este día la lámina de agua presentaba homogeneidad vertical debido a que el embalse no se encuentra estratificado. Sin embargo, en la dirección longitudinal se aprecia perfectamente el efecto de la antigua presa de Embarcaderos. La antigua presa de Embarcaderos segmenta la lámina de agua en dos zonas, cada una de ellas presenta perfiles longitudinales de temperatura con morfología plana, salvo en los puntos que se encuentran situados aguas abajo de la presa y más próximos a ella. El cuerpo principal del embalse se encuentra a mayor temperatura que el antiguo embalse de Embarcaderos, debido a que en esta época del año el agua cede calor al ambiente. El cuerpo principal contiene la mayor parte de la masa de agua contenida en el embalse, y en consecuencia, la mayor parte del calor latente almacenado durante el verano. Por ello las pérdidas de calor que experimenta el agua repercuten menos en esta zona del embalse que en la zona del antiguo embalse de Embarcaderos. Esta fragmentación se observa también en los perfiles longitudinales de conductividad eléctrica, figura 3.45. La conductividad eléctrica en el cuerpo principal del embalse se mantiene constante en toda la lámina de agua como consecuencia de la alta dilución a que se encuentra sometida la descarga del antiguo embalse de Embarcaderos.

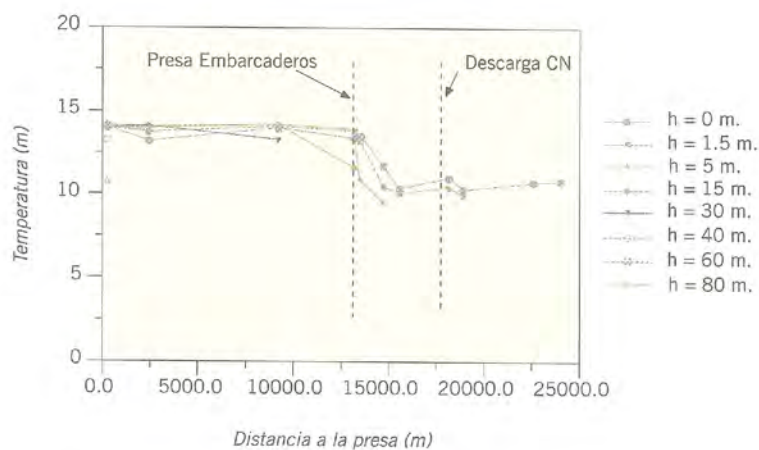


Figura 3.44.
Perfiles longitudinales de temperatura. Campaña: 28/11/01.

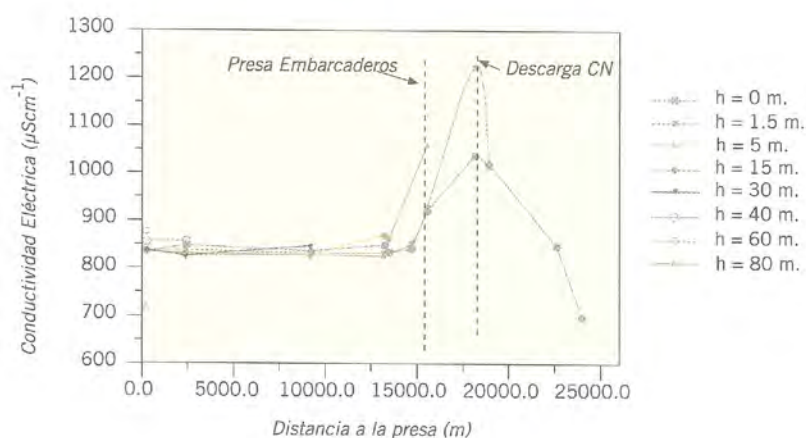


Figura 3.45.
Perfiles longitudinales de conductividad eléctrica. Campaña: 28/11/01.

Los perfiles longitudinales de temperatura medidos el día 2 de octubre de 2001 indican que en esta fecha el embalse se encuentra aún en régimen de estratificación. La capa superior, epilimnion, se encuentra mezclada totalmente e igual ocurre en la capa más profunda de la lámina de agua, hipolimnion. En esta fecha la temperatura ambiente es suficientemente alta para que el agua ceda calor al ambiente y existe homogeneidad longitudinal en el embalse no apreciándose el efecto de la antigua presa de Embarcaderos.

El perfil longitudinal de conductividad de la figura 3.45 muestra cual es el efecto de la descarga de la central nuclear de Cofrentes. Los puntos situados a más de 20.000 m corresponden a medidas realizadas en el río Júcar, aguas arriba del avenamiento del canal de descarga de la central nuclear. En el punto más alejado, la conductividad es inferior a $700 \mu\text{S cm}^{-1}$ y a medida que el punto de medida se aproxima al canal de descarga la conductividad aumenta debido a que la descarga inunda el cauce del río. En el propio avenamiento, la conductividad alcanza valores superiores $1.200 \mu\text{S cm}^{-1}$. Aguas abajo del avenamiento la conductividad disminuye debido a la dilución y en el cuerpo principal del embalse se mantiene constante.

c) Análisis de la evolución de la temperatura y conductividad eléctrica a lo largo del ciclo anual.

La evolución temporal de la temperatura durante el periodo de estudio pone de manifiesto el diferente comportamiento de la zona del embalse que ocupa el antiguo embalse de Embarcadero del resto del embalse. Como ya se ha comentado en párrafos anteriores, la antigua presa de Embarcaderos actúa de separador de la masa de agua. La zona ocupada por el antiguo embalse de Embarcaderos presenta menor inercia térmica, por lo que es más sensible a los cambios ambientales, y con ello experimenta un mayor enfriamiento durante el otoño e invierno que el cuerpo principal, que presenta alta inercia térmica. Así mismo, y por la misma razón, la velocidad de calentamiento que experimenta la masa de agua de esta parte del embalse durante la primavera es mayor que en el cuerpo principal del embalse.

En el cuerpo principal del embalse, la variación de la temperatura con el tiempo es la típica de un embalse que sufre estratificación. Al principio de la primavera, el aporte de calor desde el ambiente aumenta la temperatura de las capas más superficiales de agua, la penetración de la luz solar en el agua y las fuerzas de difusión y advención hacen que el calentamiento se prolonge hacia capas más profundas de agua hasta alcanzar el equilibrio entre las fuerzas de flotación y las gravitatorias, punto en que la transferencia de calor se hace imposible desarrollándose una termoclina bien definida. Debido a ello, las capas más profundas no experimentan transferencia de calor ni materia y permanecen a temperatura constante durante todo el ciclo anual.

El comportamiento descrito en el párrafo anterior es el comportamiento general que sigue cualquier embalse susceptible de sufrir estratificación. Sin embargo, el cuerpo principal del embalse de Cortes II presenta una particularidad que no se corresponde con el desarrollo general de la estratificación y es que durante el invierno, época en que debería existir uniformidad vertical, existe una termoclina a una profundidad de 80 m que se mantiene durante todo el año. La existencia de esta termoclina tiene su explicación en la forma de operar la central hidroeléctrica de Cortes II, ya que su salida de turbinas se encuentra a una cota más alta que la correspondiente a los 80 m de profundidad, lo que origina una acumulación en el fondo del embalse.

La conductividad eléctrica del agua contenida en el embalse aumenta durante otoño e invierno y disminuye durante primavera y verano. En cualquier punto del embalse la conductividad varía muy poco con la profundidad en toda la lámina de agua, excepto en sus capas más profundas en las que se produce un aumento de esta propiedad. El aumento es exageradamente grande aguas arriba de la presa sumergida de Embarcaderos. Debido a la puntualidad temporal de las medidas no se puede establecer que este tipo de variación sea general, ya que este

aumento tan acusado podría deberse a la presencia de una descarga de la central nuclear que se hubiera realizado un tiempo antes de realizar la medida y que hubiera viajado hasta esta sección del embalse. En este caso, una vez pasado el frente ocasionado por el vertido, la conductividad retornaría a un valor más bajo.

Otra anomalía, difícil de explicar, es el hecho de que la conductividad de la lámina de agua situada a profundidades mayores de 60 m, durante el invierno y la primavera es inferior a la del resto de la lámina de agua. Es explicable que el agua de estas capas profundas presente mayor densidad que las superiores, ya que se encuentra a una temperatura más baja y la densidad es más sensible a la temperatura que a la conductividad. Sin embargo, no es fácilmente explicable la procedencia de este agua de menor conductividad.

d) Análisis de la evolución de la Profundidad de Secchi

La Profundidad de Secchi varía en un amplio intervalo en función de la fecha en que se ha realizado la campaña de medida. La zona próxima a la presa presenta valores de Profundidad de Secchi comprendidos entre 6 y 3 m, dependiendo de la campaña de medida. El primer valor corresponde a aguas con gran transparencia a la radiación solar, mientras que el segundo corresponde a una transparencia media. Este amplio intervalo de variación no puede explicarse con base en procesos naturales, por ejemplo, las campañas realizadas en junio de 2001 y julio de 2002 se encuentran dentro del mismo periodo del ciclo anual y sin embargo presentan valores muy dispares de la Profundidad de Secchi. Por lo tanto el valor de este parámetro está condicionado por la operación de las CCEE instaladas en el embalse.

Existe una tendencia general a que la Profundidad de Secchi disminuya cuando aumenta la distancia entre el punto de medida y la presa del embalse. De hecho los valores más bajos de la Profundidad de Secchi son los medidos en las proximidades del avenamiento del río Júcar en el embalse de Embarcaderos. En este embalse, la transparencia del agua a la radiación solar es extremadamente baja. Así mismo, en algunas de las campañas se pone de manifiesto el efecto de la presa sumergida de Embarcaderos, que produce una disminución brusca en el parámetro que se comenta.

Modelización

El movimiento y la mezcla de materia disuelta o particulada en medio hídrico resulta de un conjunto complejo de mecanismos físicos de transporte que incluyen advección, convección, difusión, dispersión, penetración, mezcla, sedimentación y la acción de los gradientes de velocidad, *Fischer et al., 1979*, y por *Ford y Johnson, 1986*.

Este apartado contiene una descripción general de la elaboración de los resultados experimentales obtenidos en las campañas de campo. La elaboración de resultados está encaminada a la modelización de cada uno de los tramos de sistemas hidrológicos objeto de estudio. Con los resultados obtenidos en la elaboración de resultados y los obtenidos en la tarea de Documentación se realiza la modelización de los tramos de influencia de cada una de las centrales nucleares que se consideran en este proyecto. Para una mejor comprensión de la elaboración de resultados realizada al principio de cada subapartado se hace una introducción teórica del tema abordado.

1. ELABORACIÓN DE RESULTADOS

Las diferencias en la metodología a utilizar en la elaboración de resultados, según se realicen en ríos o embalses, han mostrado la conveniencia de hacer un tratamiento separado de ambos tipos de resultados.

1.1 Dispersión en ríos

La dispersión en ríos es un fenómeno asociado a la difusión y al flujo. Tiene su origen en la acción combinada de la advección longitudinal, cuya velocidad depende de la posición, y de la difusión lateral, tanto molecular como turbulenta. Las variaciones de velocidad en la sección transversal de la corriente posibilitan la elongación longitudinal de los vertidos, que se expanden y distribuyen a lo largo del curso de agua. En contra de esta expansión, actúa la tendencia del material en zonas de flujo rápido a ser transportado lateral y verticalmente, mediante mezcla turbulenta, a zonas de movimiento más lento, ralentizando así el proceso de dispersión. La velocidad a la que se produce la dispersión longitudinal refleja el balance entre ambos efectos contrapuestos. Si la mezcla transversal se desarrolla con rapidez, como en cursos de agua estrechos y sinuosos, o si la velocidad es uniforme, la dispersión longitudinal es baja. Por el contrario, si el grado de mezcla transversal es bajo o la distribución de velocidades es poco uniforme, como ocurre en canales anchos y poco profundos, la dispersión longitudinal es elevada.

El estudio y la modelización de la dispersión de cualquier vertido en canales abiertos involucran tres fases consecutivas e interrelacionadas llamadas campos, figura 4.1. Estas tres etapas se fijan en función de las características de la dispersión producida y responden a las siguientes propiedades:

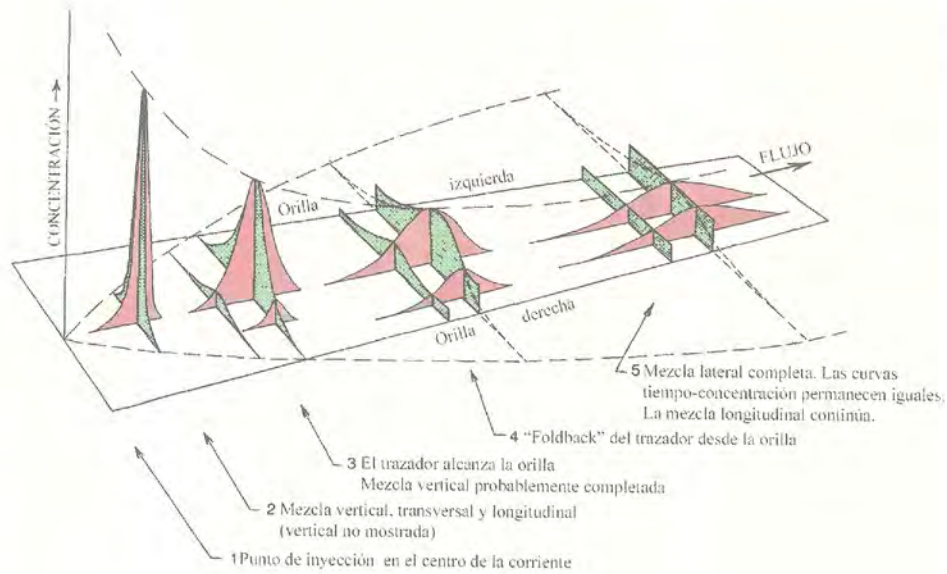


Figura 4.1. Fases de la dispersión en ríos

El campo próximo abarca la mezcla inicial del contaminante, en la que se consigue la homogeneidad de concentración en sentido vertical. La dilución que tiene lugar en esta fase está condicionada fundamentalmente por el momento inicial y la flotabilidad del vertido, esto es, por su velocidad de salida y su temperatura, si es que son diferentes de las del medio receptor. La advección y la mezcla en el campo próximo de una fuente puntual no estacionaria son importantes en las tres direcciones del espacio.

Durante esta segunda fase, conocida como campo intermedio y también como de mezcla completa, el efluente alcanza una concentración homogénea en la sección transversal de la corriente, por efecto de la turbulencia del medio receptor. La longitud del campo intermedio depende del punto de vertido, de las variaciones transversales de la velocidad, del caudal, de la rugosidad del fondo y de parámetros geométricos característicos de la sección transversal, tales como la relación anchura/profundidad.

Una vez se ha completado la mezcla en la sección transversal de la corriente, la dispersión continúa indefinidamente porque carece de fronteras físicas para su desarrollo y provoca la atenuación de los gradientes longitudinales de concentración. La escala espacio-temporal es mucho mayor en el campo lejano que en los dos campos anteriores, por lo que aumenta la posibilidad de que se produzcan interacciones entre los vertidos y el medio que los dispersa. El estudio del campo lejano se centra en el comportamiento de la concentración promedio en la sección transversal a pesar de lo cual, siempre que el foco emisor no sea una fuente estacionaria de un compuesto conservativo, existen gradientes transversales de concentración.

El principio del campo lejano se sitúa a una distancia del punto de vertido conocida como longitud de mezcla. La evaluación de la longitud de mezcla puede realizarse mediante aproximaciones y fórmulas empíricas sencillas, Rimmar, 1960; Hull, 1962; Yotsukura y Cobb, 1972; Fischer et al, 1979; sin embargo, debido a la individualidad de cada río, la evaluación real de la longitud mínima de mezcla sólo puede realizarse por vía experimental, mediante inyección de trazadores.

1.1.1. Coeficientes de Dispersión

En el campo lejano, el parámetro principal que determina la capacidad dispersante de una corriente es su coeficiente de dispersión longitudinal, que relaciona la transferencia de materia con el gradiente de concentraciones que la impulsa.

El coeficiente de dispersión depende de la velocidad media de la corriente y de sus variaciones puntuales en la sección transversal, de la rugosidad del cauce, de la pendiente de la línea de energía de la superficie del agua y de las dimensiones geométricas de la sección de paso, tales como la profundidad, la anchura y el radio hidráulico. El coeficiente de dispersión puede calcularse a partir de medidas fluidodinámicas en las corrientes abiertas o mediante las distribuciones concentración-tiempo obtenidas en campañas experimentales de trazador. Los métodos fluidodinámicos tienen, a su vez, dos vertientes, los que proceden de un desarrollo analítico, que tienen su base en una modelización físico-matemática, y aquellos otros que utilizan correlaciones obtenidas experimentalmente.

Determinación experimental del coeficiente de dispersión mediante el uso de trazadores

El estudio de la dispersión mediante trazadores químicos o radioactivos se basa en el supuesto de que el trazador inyectado en la corriente se comporta de la misma manera que los elementos de fluido de la misma. El movimiento de una nube de trazador producida mediante una inyección puntual instantánea se representa mediante curvas concentración-tiempo y/o concentración-posición espacial. La morfología de estas curvas depende de cuatro factores:

- La cantidad total de trazador inyectada.
- Las pérdidas de trazador en su recorrido entre los puntos de inyección y medida.
- El caudal que circula por el tramo de canal en estudio.
- La capacidad dispersante de la corriente.

a) Estadísticos de la distribución de concentración de la nube de trazador

Antes de pasar a la descripción de los métodos de cálculo de los coeficientes de dispersión longitudinal resulta conveniente enumerar el conjunto de paráme-

tros estadísticos usados con más frecuencia en el análisis de las curvas de trazador, algunos de los cuales están íntimamente relacionados con los coeficientes de dispersión. Entre estos estadísticos se encuentran los siguientes:

- Tiempo medio.
- Concentración y tiempo del máximo.
- Momentos centrales.
- Desviación típica.
- Razón de asimetría.
- Coeficiente de sesgo.
- Coeficiente de curtosis.

El tiempo medio o centroide de una distribución es el valor del tiempo para el cual el área bajo los dos tramos en que éste divide la curva es la misma. Representa el valor del tiempo para el cual ha pasado la mitad del trazador inyectado. Para una inyección instantánea de trazador, que no experimentara deformación alguna por efecto de la dispersión, este tiempo medio sería la relación entre la distancia entre los puntos de inyección y de toma de muestras y la velocidad media de la corriente. El centroide de la distribución puede calcularse mediante la siguiente expresión:

$$t_m = \frac{\int_0^{\infty} t C_m(t) dt}{\int_0^{\infty} C_m(t) dt} \quad [4.1]$$

donde t y $C_m(t)$ son los pares de valores de tiempo y concentración de la curva de trazador.

La concentración y tiempo del máximo son los dos parámetros que caracterizan el pico de la distribución, tanto en su valor como el tiempo en que se produce.

El tiempo medio constituye la base para definir los momentos centrales de una distribución, de acuerdo con la siguiente expresión que corresponde al momento central de orden n .

$$\mu_n = \frac{\int_0^{\infty} (t - t_m)^n C_m(t) dt}{\int_0^{\infty} C_m(t) dt} \quad [4.2]$$

Del conjunto de momentos centrales que la ecuación 4.2 permite calcular, el más ampliamente utilizado es la varianza o segundo momento central, definida como la media de los cuadrados de las desviaciones a la media y que da idea del agrupamiento o dispersión de las frecuencias de una distribución, en este caso valores de concentración, entorno al centroide de la misma.

$$\sigma_t^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - t_m)^2 C_m(t) dt}{\int_0^{\infty} C_m(t) dt} \quad [4.3]$$

Cuanto mayor sea la varianza de una curva, mayor es el coeficiente que justifica la dispersión experimentada por el trazador.

La desviación típica es la raíz cuadrada de la varianza. Para una distribución normal, intervalos de una, dos y tres desviaciones típicas entorno al tiempo medio representan, respectivamente, el 68,27; 95,45 y 99,73 % del área bajo la curva.

La razón de asimetría de una distribución es la relación entre el tiempo medio y el tiempo del máximo.

El coeficiente de sesgo mide la asimetría de una distribución entorno a su centroide, por lo que para una curva gaussiana vale cero. Se define estadísticamente como la relación adimensional entre el segundo (μ_2) y tercer (μ_3) momentos centrales, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\lambda_3 = \frac{\mu_3}{\mu_2^{3/2}} \quad [4.4]$$

El coeficiente de curtosis indica el achatamiento de una distribución y queda definido estadísticamente como la relación adimensional entre el segundo (μ_2) y cuarto (μ_4) momentos centrales, como se indica en la siguiente ecuación:

$$\lambda_4 = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} \quad [4.5]$$

El seguimiento de la evolución de los trazadores vertidos en una corriente puede realizarse, asimismo, a partir de distribuciones concentración-distancia. Los estadísticos de estas curvas responden a expresiones similares a las ya vistas. Las ecuaciones 4.6 y 4.7 recogen las expresiones correspondientes a la posición media y a la varianza espacial de este tipo de distribuciones.

$$x_m = \frac{\int_0^{\infty} x C_m(x) dx}{\int_0^{\infty} C_m(x) dx} \quad [4.6]$$

$$\sigma_x^2 = \frac{\int_0^{\infty} (x - x_m)^2 C_m(x) dx}{\int_0^{\infty} C_m(x) dx} \quad [4.7]$$

donde x y $C_m(x)$ son los pares de valores de posición y concentración de la curva de trazador.

b) Métodos de cálculo

La bibliografía recoge diferentes métodos para la estimación del coeficiente de dispersión longitudinal, aunque todos ellos se basan en dos premisas fundamentales:

- El proceso de dispersión longitudinal se desarrolla según la ley de Fick.
- El valor del coeficiente de dispersión se mantiene constante entre puntos de muestreo consecutivos.

Entre los métodos de uso más frecuente se encuentran los recogidos en la tabla 4.1.

Método	Coefficiente de dispersión (m ² s ⁻¹)	Número de ecuación
Taylor (1954)	$\frac{u_m^3(t_1 - t_2)^2}{11,09x}$	[4.8]
Concentraciones iguales	$\frac{\left(\frac{(x - u_m t_2)^2}{2t_2} - \frac{(x - u_m t_1)^2}{2t_1} \right)}{\ln \frac{t_1}{t_2}}$	[4.9]
Cambio de momentos inyección medida Fischer (1979)	$\frac{1}{2} \frac{d\sigma_x^2}{dt} \cong \frac{\sigma_t^2 u_m^2}{2t_m}$	[4.10]
Cambio de momentos interestaciones Fischer (1979)	$\frac{u_m^2}{2} \frac{\sigma_{t_2}^2 - \sigma_{t_1}^2}{t_{m2} - t_{m1}}$	[4.11]
Concentración máxima Taylor (1954)	$\frac{M_0^2}{4\pi t_m C_{max}^2 A^2}$	[4.12]

Tabla 4.1.
Métodos de cálculo del coeficiente de dispersión

Los métodos de Taylor, concentraciones iguales y concentración máxima se basan en propiedades de las distribuciones gaussianas.

El método del Cambio del Momento, en sus dos versiones, es el de uso más generalizado y consiste en relacionar el valor del coeficiente de dispersión con el cambio que la varianza de la nube de trazador experimenta a medida que ésta se desplaza. El procedimiento de cálculo indicado es válido si la nube de trazador se comporta de acuerdo con la teoría de Taylor, 1954, sin importar la forma de la distribución inicial o si se usan curvas concentración-tiempo o concentración-distancia.

1.1.1.2. Determinación del coeficiente de dispersión a partir de medidas fluidodinámicas

Los métodos fluidodinámicos tienen, a su vez, dos vertientes, los que proceden de un desarrollo analítico, que tienen su base en una modelización físico-matemática, y aquellos otros que utilizan correlaciones obtenidas experimentalmente.

El método analítico para el cálculo de coeficientes de dispersión longitudinal, Fischer, 1967, parte de la ecuación de conservación de materia en flujo turbulento y realiza los siguientes supuestos:

- Todo el movimiento se produce en una única dirección.
- El transporte de materia en la dirección del flujo debido a fluctuaciones de la turbulencia es despreciable.

Estas simplificaciones permiten expresar el balance de materia en un elemento diferencial de volumen mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\epsilon_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\epsilon_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad [4.13]$$

donde C y u son la concentración y velocidad medias puntuales, y , es la coordenada transversal, y z es la coordenada vertical en la dirección del flujo, ϵ_y y ϵ_z los coeficientes de mezcla turbulenta en las direcciones antes indicadas. Después de un desarrollo matemático en el que cada variable es tratada como la suma de su valor medio y de sus fluctuaciones ocasionadas por la turbulencia, puede llegarse a la siguiente ecuación:

$$D_L = - \frac{I}{A} \int_0^W q'(y) dy \int_0^y \frac{I}{\epsilon_y d(y)} dy \int_0^y q'(y) dy \quad [4.14]$$

donde W es el ancho en superficie, $d(y)$ es la profundidad para un punto de la sección con coordenada transversal y , y $q'(y)$ es la velocidad integrada respecto a la profundidad en el punto de coordenada y , de acuerdo con la siguiente expresión:

$$q'(y) = \int_0^{d(y)} u'(y,z) dz \quad [4.15]$$

donde $u'(y, z)$ es la variación espacial de la velocidad u respecto a su valor medio u_m .

El coeficiente lateral de mezcla turbulenta, ϵ_y , que aparece en la ecuación 4.13, ha de ser medido experimentalmente o estimado mediante la correlación propuesta por *Elder, 1959*, para canales de laboratorio:

$$\epsilon_y = 0,23 du_* \quad [4.16]$$

donde d es la profundidad hidráulica y u_* es la velocidad de fricción, definida por la siguiente expresión:

$$u_* = \sqrt{gdS_e} \quad [4.17]$$

donde S_e es la pendiente de energía de la superficie del agua y g es la aceleración de la gravedad.

La ecuación 4.14 proporciona una expresión para la estimación del coeficiente de dispersión en un canal de elevada relación anchura/profundidad, preferiblemente mayor de 6 m, en el que hay variaciones laterales de velocidad significativas.

El método analítico de Fischer se haya sólidamente fundamentado en los fenómenos básicos que son causa de la dispersión, por lo que los resultados que proporciona son adecuados, siempre que los datos experimentales utilizados tengan la calidad suficiente. El principal inconveniente que el método plantea es que la evaluación del coeficiente de dispersión tiene carácter puntual. La utilización de estos coeficientes para realizar predicciones en un tramo de río implica que las condiciones fluidodinámicas del tramo estén adecuadamente representadas por las de la sección donde se han realizado las medidas.

La determinación de los coeficientes de dispersión mediante los dos métodos anteriores precisa la realización de trabajos experimentales de campo, por lo que no siempre es posible disponer de los datos necesarios para su aplicación. Numerosos autores han tratado de salvar este inconveniente proponiendo correlaciones obtenidas empíricamente, que evalúan el coeficiente de dispersión a partir de magnitudes que describen de forma general la sección transversal de la corriente y las condiciones de flujo. El principal inconveniente de estos métodos se halla en que carecen de elementos para evaluar las variaciones transversales de la velocidad de la corriente, que son la causa fundamental de la dispersión. Este hecho condiciona que estos métodos proporcionen valores similares del coeficiente de dispersión para lechos de características hidráulicas y geométricas semejantes que, en la práctica, pueden presentar muy diferentes propiedades dispersantes.

En la tabla 4.2 se muestra una selección de las correlaciones recogidas en la bibliografía.

1.2. Resultados de campañas en ríos

El análisis de los resultados de las campañas experimentales de trazador proporciona, en términos estadísticos, una descripción espacio-temporal del paso de la mancha de trazador por las diferentes estaciones de muestreo, de modo que permite la caracterización de la dinámica de dispersión-dilución y transporte del tramo estudiado. Así pues, la elaboración de resultados ha consistido en calcular

Tabla 4.2.
Algunas correlaciones recogidas en la bibliografía

Autor	Coefficiente de dispersión (m ² s ⁻¹) ⁽¹⁾	Número de ecuación
Taylor (1954)	$10,1au_*$	[4.18]
Elder (1959)	$5,93du_*$	[4.19]
Thackston y Krenkel (1967)	$7,25du_* \left(\frac{u_m}{u_*}\right)^{1/4}$	[4.20]
McQuivey y Keefer (1974)	$0,058 \frac{Q}{S_e W}$	[4.21]
Fischer (1975)	$0,011 \frac{u_m^2 W^2}{u_* d}$	[4.22]
Liu (1977)	$\beta_L \frac{u_m^2 W^3}{u_* A} = \beta_L \frac{Q^2}{u_* r^3}$	[4.23]
	$\beta_L = 0,18 \left(\frac{u_*}{u_m}\right)^{1,5} = 0,18 \left(\frac{\sqrt{gr} S_e}{u_m}\right)^{1,5}$	[4.24]
	$\beta_L = \frac{u_m^2 W^3}{u_* A} = \beta_L \frac{Q^2}{u_* r^3}$	[4.25]
Christensen (1977)	$\beta_L = 0,41 \left(\frac{u_*}{u_m}\right)^2 = 0,41 \left(\frac{\sqrt{gr} S_e}{u_m}\right)^2$	[4.26]
Sánchez et al (1996)	$\frac{D_L}{u_m d} = 0,3022 R_c^{-0,4279} \left(\frac{u_m}{u_*}\right)^{0,2046} \left(\frac{W}{d}\right)^{1,9706} S_e^{-0,6213}$	[4.27]
	$R_c = \frac{u_m d \rho}{\mu}$	[4.28]

(1) Todas las correlaciones calculan el coeficiente de dispersión excepto la de Sánchez que calcula la intensidad de la dispersión (DL/umd)

los estadísticos de las distribuciones de concentración de trazador y los coeficientes de dispersión en los tramos objeto de estudio. Los estadísticos y coeficientes de dispersión calculados para cada una de las campañas realizadas se han correlacionado frente a la distancia al punto de inyección. Dichas ecuaciones se han introducido en la base de datos del código CORVEL.

De los estadísticos de las distribuciones de trazador existen algunos que presentan un comportamiento general similar, independientemente del tramo de río considerado y del caudal circulante. Estos estadísticos son: concentración máxima y tiempo de máximo, varianza temporal, desviación típica, razón de asimetría y coeficiente de sesgo. Este comportamiento general se puede resumir en los siguientes aspectos:

- *Concentración máxima y tiempo de máximo.* La concentración máxima de trazador de las distribuciones experimentales presenta un valor inferior al de las curvas modelizadas mediante las distribuciones gaussianas en todos los casos. Estas diferencias se deben al carácter no gaussiano de las distribuciones experimentales, que ya se ha comentado con anterioridad. Los tiempos de máximos obtenidos de las distribuciones experimentales, así como su variación con la distancia al punto de inyección son similares a los obtenidos de las curvas modelizadas mediante las distribuciones gaussianas.
- *Varianza temporal.* En todos los casos, la varianza de la distribución obtenida en la primera estación son muy similares y a su vez similares a la obtenida de la curva modelizada mediante curvas gaussianas. En la distribución de la segunda estación de muestreo y sucesivas, la varianza de la distribución obtenida con un régimen de caudal alto es menor que la de la curva gaussiana y que la de las campañas realizadas con un régimen de caudal más bajo.
- *Desviación típica.* Los comentarios realizados para la varianza son aplicables a las desviaciones típicas de las distribuciones.
- *Razón de asimetría y coeficiente de sesgo.* Ambos parámetros proporcionan información sobre la asimetría de las curvas de trazador. Su análisis permite establecer que:
 - A medida que la mancha de trazador se desplaza gana en simetría.
 - Las distribuciones obtenidas en las campañas realizadas con alto caudal presentan menor simetría que las obtenidas cuando el caudal era menor.
 Las ecuaciones de ajuste de la razón de asimetría con la distancia al punto de inyección presentan valores de pendiente negativos. Lo que muestra la tendencia de las distribuciones a adquirir un mayor grado de simetría a medida que la mancha se desplaza aguas abajo del punto de inyección. Los coeficientes de sesgo de las distribuciones gaussianas muestran una evolución paralela a la correspondiente a las curvas experimentales, aunque con valores menores.

1.2.1. Tramo comprendido entre las centrales hidroeléctricas de PuenteIarrá y Cabriana

Este subtramo de río se halla confinado entre dos embalses por lo que la circulación de agua está completamente regulada y sometida a las necesidades marcadas por la explotación hidroeléctrica o el regadío de la zona. El caudal medio medido a partir de las distribuciones de trazador obtenidas en este tramo ha sido de 10,56 y 39,11 m³ s⁻¹.

a) *Estadísticos de la mancha de trazador*

El conjunto de datos experimentales proporcionados por las dos campañas realizadas en este tramo permiten realizar las siguientes observaciones:

- *Velocidad media.* En la campaña que se realizó con régimen de caudal alto, la velocidad media de la nube de trazador disminuye de una forma importante entre las dos estaciones de muestreo. La velocidad media de la nube de trazador calculada para ambas estaciones de muestreo son de 0,21 y 0,12 m s⁻¹, velocidad que corresponde a una masa de agua que fluye a lo largo del cauce del río. Sin embargo, la diferencia de velocidades entre ambas estaciones es considerable por efecto del embalsamiento del agua causado por el dique de la central hidroeléctrica de Cabriana. Como consecuencia de la diferencia de caudales entre ambas campañas, estos valores de velocidad son considerablemente mayores que los obtenidos en la campaña realizada con un régimen de bajo caudal, 10,56 m³ s⁻¹. La disminución de velocidad media y la diferencia entre velocidad inyección-medida e inter-estaciones son más acusadas en la campaña realizada con mayor caudal que en la realizada con un caudal más bajo.
- *Tiempo medio.* Como consecuencia del mayor valor de la velocidad media, los tiempos de paso de la nube de trazador por las dos estaciones de muestreo son considerablemente menores que los calculados en la campaña que se realizó con un caudal menor.
- *Área de las secciones transversales del cauce sumergido.* El área de la sección transversal del cauce sumergido experimenta un fuerte aumento entre las dos estaciones de muestreo. Este aumento es más acusado en la campaña realizada con mayor caudal y puede ser debido a la inundación de llanuras adyacentes al cauce del río que se produce al ser mayor el caudal de agua circulante. Este aumento es más fácilmente apreciable en los valores de área entre estaciones consecutivas, donde no existe el efecto acumulativo asociado al cálculo cuando se consideran el punto de inyección y cada uno de los puntos de muestreo.
- *Anchura de la curva.* La anchura de la curva a una concentración igual a la mitad de la concentración máxima proporciona una medida de la capacidad dispersante del flujo basada en propiedades de distribuciones gaussianas. En la estación 1, los resultados de la anchura de la curva para las dos campañas son coherentes con lo comentado anteriormente para las velocidades y tiempos medios de las nubes de trazador. Sin embargo, en la estación 2, las variaciones del tiempo medio y de la anchura de curva con el caudal presentan un comportamiento inverso, lo que indica que, entre la primera y

segunda estación, la dispersión de la nube de trazador con el caudal más alto es menor que en la campaña en que el caudal era menor.

b) Coeficiente de dispersión

En la campaña realizada con caudal más bajo, los coeficientes varían entre 2,31 y 6,97 $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$. En la realizada con mayor caudal, los coeficientes han oscilado entre 11 y 26,59 $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

El conjunto de valores obtenidos para los coeficientes de dispersión permite resaltar los puntos fundamentales:

- En la campaña realizada con un caudal medio de 39,11 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, los valores de los coeficientes de dispersión proporcionados por los diferentes métodos utilizados son diferentes. Dado que el método de Taylor y el de la Concentración Máxima se definen para distribuciones gaussianas, este hecho indica la falta de similitud entre las curvas experimentales de trazador con este tipo de distribuciones. No ocurre lo mismo en la campaña realizada con un caudal de 10,56 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, en la que los valores de los coeficientes calculados por diferentes métodos son muy próximos. Este diferente comportamiento indica que en la inyección realizada con un régimen de caudal más alto las distribuciones de concentración de trazador se encuentran más alejadas del comportamiento gaussiano. Lo cual puede estar relacionado con las imperfecciones de flujo comentadas en el análisis de resultados experimentales para el caso de la segunda campaña.
- Los valores de coeficientes de dispersión calculados en la primera estación, independientemente del método utilizado en su determinación, presentan valores que se encuentran en el rango normal de valores para este coeficiente en ríos.
- En la segunda estación, los valores de coeficientes de dispersión calculados por los métodos de Taylor y el de la Concentración Máxima son muy bajos si se les compara con los calculados por los dos métodos del Cambio de Momentos. La explicación a estos resultados puede ser la separación de las distribuciones experimentales a distribuciones de tipo gaussiano.
- En la campaña en la cual el caudal medio fue de 10,56 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$, el coeficiente aumenta con la distancia al punto de inyección. En la segunda campaña, la forma en que varía el coeficiente de dispersión con la distancia al punto de inyección depende del método utilizado en el cálculo de este parámetro. Si el coeficiente se ha calculado utilizando el método de Taylor o el de Concentración Máxima, el coeficiente disminuye con la distancia al punto de inyección. Si el método utilizado ha sido cualquiera de los métodos de Cambio de Momentos, el coeficiente disminuye ligeramente con la distancia al punto de inyección. El primer tipo de

comportamiento puede ser ocasionado, por la ya comentada separación de los perfiles experimentales de perfiles tipo gaussiano. El segundo puede explicarse debido a la menor velocidad media de la nube de trazador a su paso por la segunda estación. La baja velocidad en una sección transversal relativamente grande no permite grandes variaciones de velocidad en sentido transversal, que es la causa fundamental de la dispersión longitudinal. La difusión molecular tiene una contribución mucho menor a la elongación total de la mancha de trazador que las variaciones de velocidad de advección. Esta explicación se ve reforzada si se comparan los valores de los coeficientes calculados por el método de Cambio de Momentos para el tramo inyección-medida y para ínter estaciones. El calculado por el primer método es muy parecido al de la primera estación, ya que acumula la historia de todo el tramo recorrido desde el punto de inyección. Sin embargo, el calculado por el segundo método, que solamente acumula información del recorrido de la nube entre las dos estaciones, acusa mayor disminución respecto al coeficiente de la primera estación.

Independientemente de la campaña y estación considerada, los valores del coeficientes de dispersión calculados mediante correlaciones son muy dispares. Los valores de las correlaciones de Thackston y Elder proporcionan valores del coeficiente de dispersión demasiado bajos. Esta discrepancia es debida a que en ambas correlaciones solamente se consideran parámetros geométricos del cauce y la velocidad de fricción. En el caso de la correlación de Thackston, también se incluye en la formulación la velocidad media pero con bajo índice de ponderación, en la ecuación se encuentra elevada a 0,25. La correlación propuesta por Christensen proporciona valores excesivamente altos del coeficiente de dispersión en ambas estaciones de muestreo, la desviación en el cálculo se debe a que en esta correlación no se considera la velocidad media de la corriente. Por último las correlaciones de Sánchez, Liu, y Fischer calculan valores del coeficientes de dispersión que se encuentran dentro del mismo orden de magnitud que los calculados a partir de las distribuciones de concentración de trazador.

1.2.2. Tramo comprendido entre la central hidroeléctrica de Cabriana y la cola del embalse del Cortijo

Este subtramo de río se halla confinado entre dos embalses por lo que la circulación de agua está completamente regulada y sometida a las necesidades marcadas por la explotación hidroeléctrica o el regadío de la zona. Otra característica de este tramo del río Ebro es que el flujo se encuentra modificado en diferentes puntos por la presencia de pequeños diques, azudes y pilares de puentes. Los caudales medios medidos a partir de las distribuciones de trazador obtenidas en este tramo ha sido de 33,23 y 49,66 m³ s⁻¹.

a) *Estadísticos de la mancha de trazador*

El conjunto de datos experimentales proporcionados por las dos campañas realizadas permiten establecer las siguientes observaciones:

- *Velocidad media.* En la campaña realizada con un régimen de caudal alto, la velocidad media de la nube de trazador aumenta con la distancia al punto de inyección. Los valores de velocidad media calculados entre dos estaciones de muestreo consecutivas y los calculados entre el punto de inyección y la estación considerada son iguales, excepto en el caso de la última estación en la que difieren en una pequeña cantidad (1 m s^{-1}). Estos resultados son coherentes con los obtenidos cuando el caudal era menor, excepto en la cuarta estación de muestreo. Los caudales estimados para la cuarta estación de muestreo en las dos campañas realizadas son muy parecidos, presentan un 9% de diferencia, 63,23 y 69,49 $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$, sin embargo, las velocidades medias ínter estaciones se diferencian en un 19%. Además, el área transversal es inferior en la campaña que se realizó con un caudal mayor que en la de menor caudal, lo que implica que el espesor de la lámina de agua es inferior en la campaña que se realizó con un caudal más alto. Todos estos hechos se pueden justificar con la base de que el embalse del Cortijo presentara un grado de llenado menor en la actual campaña que en la realizada con anterioridad, por lo que la cola del embalse afectaría de forma diferente a la cuarta estación de muestreo en cada una de las campañas realizadas.
- *Tiempo medio.* Como consecuencia del mayor valor de la velocidad media, los tiempos de paso de la nube de trazador por las tres estaciones de muestreo son considerablemente menores en la campaña realizada bajo régimen de alto caudal que los calculados en la campaña con un caudal menor.
- *Área de las secciones transversales del cauce sumergido.* El área de la sección transversal del cauce sumergido aumenta con la distancia al punto de inyección. El aumento es más acusado entre las dos primeras estaciones que entre la segunda y cuarta estación. Las áreas de las secciones transversales calculadas entre dos estaciones consecutivas y entre el punto de inyección y el de muestreo considerado son muy próximas, lo que indica que no se producen aumentos de área puntuales.
- *Anchura de la curva.* La anchura de la curva a una concentración igual a la mitad de la concentración máxima proporciona una medida de la capacidad dispersante del flujo. La anchura de la curva aumenta con la distancia al punto de inyección. Para las dos campañas realizadas, la anchura de la

curva calculada para la segunda y cuarta estaciones son muy similares. Sin embargo, en la primera estación la anchura de la curva varia de forma inversamente proporcional al caudal, lo que indica que la nube de trazador ha sufrido un menor grado de dispersión en la campaña con alto régimen de caudal que en la realizada con caudal menor.

b) Coeficiente de dispersión

Los valores de los coeficientes de dispersión han oscilado entre 3,32 y 79,05 y 3,66 y 270 $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ para las campañas realizadas a menor y mayor caudal, respectivamente.

El conjunto de valores obtenidos para los coeficientes de dispersión permite resaltar los puntos fundamentales:

- Los valores de los coeficientes de dispersión proporcionados por los diferentes métodos utilizados son diferentes. Dado que el método de Taylor y el de la Concentración Máxima han sido definidos específicamente para distribuciones gaussianas, este hecho indica la falta de similitud entre las curvas experimentales de trazador con este tipo de distribuciones.
- El valor del coeficiente de dispersión calculado por el método de Taylor en la primera estación en ambas campañas es muy similar, esto indicaría que el caudal de agua circulante no afectaría al grado de dispersión de la nube de trazador. El tramo de río entre el punto de inyección y la primera estación de muestreo se encuentra canalizado en gran parte de su longitud, lo que puede hacer que los gradientes verticales de velocidad se vean poco afectados por el caudal.
- Salvo el caso comentado en el párrafo anterior, los coeficientes calculados en la campaña realizada con un régimen de caudal alto son mayores que en la campaña realizada con menor caudal.
- Independientemente del método de cálculo utilizado, los coeficientes de dispersión aumentan con la distancia al punto de inyección.

El análisis de los resultados de la aplicación de correlaciones Thackston, Elder y Christensen en el cálculo del coeficiente de dispersión llevan a las mismas conclusiones que las obtenidas en el tramo entre las centrales hidroeléctricas de Puentelarrá y Cabriana, por lo que aquí no se comentan. En cuanto a los valores del coeficiente de dispersión calculados con las correlaciones de Sánchez, Liu y Fischer, se ajustan mal a los valores calculados a partir de las distribuciones de concentración de trazador. Conviene destacar que las correlaciones calculan valores puntuales del coeficiente de dispersión, sin considerar las características del flujo aguas arriba del punto al que se aplican. Esta puede ser la razón del mal ajuste

obtenido, si se considera que el tramo central hidroeléctrica Cabriana-El Cortijo es un tramo en el que el flujo se ve modificado frecuentemente por la presencia de diques, azudes y pilares de puentes.

1.2.3. Tramo comprendido entre la central nuclear de Ascó y la localidad de Amposta

Se trata de un tramo de río en régimen de regulación. Su caudal se encuentra controlado por la descarga de los embalses de Ribarroja y Mequinenza. El único impedimento importante que se presenta al flujo es el azud de Cherta. Los caudales medios medidos a partir de las distribuciones de trazador obtenidas en este tramo ha sido de 180 y 350,21 m³ s⁻¹.

a) Estadísticos de la mancha de trazador

El conjunto de datos experimentales proporcionados por ambas campañas permiten realizar las siguientes observaciones:

- *Velocidad media.* La variación de la velocidad media entre las estaciones de muestreo es diferente para cada una de las campañas realizadas. En la primera campaña, la velocidad media en las dos primeras estaciones se mantiene constante y en un valor más alto que en el resto de estaciones. Las dos últimas estaciones son las que presentan menor velocidad. En la segunda campaña, la velocidad media calculada para la distancia entre el punto de inyección y el punto de muestreo presenta un comportamiento irregular con la distancia al punto de inyección. Aumenta entre la primera y segunda estación, entre esta estación y la cuarta disminuye y en el último tramo vuelve a aumentar. Este comportamiento se ve más acusado en las velocidades medias calculadas para dos estaciones de muestreo consecutivas. La disminución de velocidad entre la tercera y cuarta estación está justificada por la presencia del azud de Cherta, situado a pocos metros aguas arriba de la cuarta estación de muestreo, el azud interrumpe el flujo y ralentiza la corriente de agua. La velocidad entre la cuarta y quinta estación sufre un aumento mayor del esperado. Es lógico que la velocidad aumente ligeramente una vez superado el azud de Cherta, sin embargo el aumento no debería ser tan acusado como manifiestan los resultados experimentales, ya que la pendiente en este tramo de río es baja por su proximidad al Delta del Ebro. La explicación a este excesivo aumento de velocidad se encuentra en que durante el paso de la mancha por la estación de Cherta, el caudal de agua experimentó un fuerte aumento, aumento que permaneció hasta el final de la campaña.
- *Tiempo medio.* Como consecuencia del mayor valor de la velocidad media, los tiempos de paso de la nube de trazador por las 5 estaciones de muestreo

en la campaña realizada con mayor caudal son considerablemente menores que los calculados en la campaña con un caudal menor.

- *Área de las secciones transversales del cauce sumergido.* El área transversal de las secciones en las que se ha situado un punto de medida aumenta hasta la sección correspondiente al punto de muestreo de Cherta. Esta sección presenta el máximo de sección transversal de todo el tramo debido a la presencia del azud del mismo nombre. La anchura del azud es de 350 m y eleva la lámina de agua debido al embalsamiento que produce, de forma que el área de la sección transversal aumenta considerablemente. Este aumento se observa mejor si se comparan las áreas transversales entre dos estaciones de muestreo consecutivas. Estas áreas, para la campaña realizada con mayor caudal, son 466,39; 779,318 y 317,28 m² para las estaciones de Benifallet, Cherta y Tortosa, respectivamente.
- *Anchura de la curva.* La anchura de la curva a una concentración igual a la mitad de la concentración máxima proporciona una medida de la capacidad dispersante del flujo. En ambas campañas, la anchura de la curva aumenta con la distancia al punto de inyección, salvo en la cuarta estación de muestreo en que disminuye. Este comportamiento no tiene una explicación en el fenómeno de la dispersión. Dado que los valores de la anchura de la curva de las estaciones tres y cuatro es muy pequeña y dado que entre ambas estaciones el flujo se interrumpe por la presencia del azud de Cherta, interrupción que hace menor el coeficiente de dispersión, podría ocurrir que el aumento de la anchura de la curva entre las dos estaciones fuera muy pequeño y la disminución se deba a los errores que implica toda medida experimental y aún más con las características de una campaña de trazador en un río.

b) Coeficiente de dispersión

Los coeficientes calculados para la campaña realizada con un caudal medio de 180 m³s⁻¹ varían entre 67,8 y 196,3 m²s⁻¹. Para la campaña realizada con caudal medio de 350,21 m³ s⁻¹, los coeficientes varían entre 84,41 y 339,68 m² s⁻¹.

El conjunto de valores obtenidos para los coeficientes de dispersión permite resaltar los puntos fundamentales:

- Los valores de los coeficientes de dispersión proporcionados por los diferentes métodos utilizados son diferentes. Dado que el método de Taylor y el de la Concentración Máxima han sido definidos específicamente para distribuciones gaussianas, este hecho indica la falta de similitud entre las curvas experimentales de trazador con este tipo de distribuciones.
- En las estaciones primera, tercera y cuarta, el método de Concentraciones Iguales proporciona valores del coeficiente de dispersión anormalmente altos,

- Los coeficientes de dispersión calculados por el método de Taylor y de la Concentración Máxima proporcionan valores máximos del coeficiente de dispersión en la segunda estación, mientras que con los métodos de Cambio de Momento, el máximo se produce en la tercera estación. Esto último ocurre igual en ambas campañas.
- Cuando se utilizan los métodos de Taylor y de la Concentración Máxima para calcular el coeficiente de dispersión, en las dos primeras estaciones, los coeficientes calculados en la campaña realizada con un caudal más alto son mayores que en la otra campaña. En las tres últimas estaciones los coeficientes calculados en ambas campañas son prácticamente iguales.
- Si el método utilizado en el cálculo de los coeficientes de dispersión es el de Cambio de Momento, aplicado al tramo comprendido entre dos estaciones de muestreo consecutivas, los coeficientes de dispersión calculados en la campaña realizada con un caudal más alto, para las tres primeras estaciones, es mayor que los calculados en la otra campaña. En las dos últimas estaciones los valores calculados en ambas campañas son muy similares. Si este método se aplica al tramo inyección - punto de muestreo el coeficiente de dispersión calculado en todas las estaciones aumenta con el caudal. Este cambio de comportamiento en función del tramo al que se aplique el método es debido al efecto memoria que genera la aplicación en el tramo inyección-punto de muestreo.
- Independientemente del método de cálculo utilizado, los coeficientes de dispersión aumentan con la distancia al punto de inyección.

El análisis de los resultados de la aplicación de correlaciones Thackston y Elder en el cálculo del coeficiente de dispersión llevan a las mismas conclusiones que las obtenidas en el resto de tramos del río Ebro estudiados, por lo que aquí no se comentan. En cuanto a los valores del coeficiente de dispersión calculados con las correlaciones de Sánchez y Fischer, se ajustan mal a los valores calculados a partir de las distribuciones de concentración de trazador. Por último, los valores calculados por las correlaciones de Christensen y Lui son los más ajustados a los valores calculados a partir de las distribuciones de concentración de trazador.

1.2.4. Tramo comprendido entre la central nuclear de Trillo y la cola del embalse de Entrepeñas

Se trata de un tramo de río en libre de circulación. No existen impedimentos importantes al flujo. Los caudales medios medidos a partir de las distribuciones de trazador obtenidas en este tramo ha sido de 8,11; 23,12 y 31,88 m³ s⁻¹.

a) Estadísticos de la mancha de trazador

El conjunto de datos experimentales proporcionados por ambas campañas permiten realizar las siguientes observaciones:

- *Velocidad media.* Los valores de la velocidad media del trazador entre el punto de inyección y cada uno de los puntos de muestreo permiten dividir el tramo estudiado en dos segmentos en los que la variación de la velocidad con la distancia presenta diferentes características. El primero de ellos abarca desde el punto de inyección hasta la tercera estación de muestreo, una distancia total de 2.451 m. Las velocidades calculadas disminuyen de forma progresiva con la distancia y presentan valores crecientes a medida que aumenta el caudal circulante. El segundo, que abarca desde la tercera estación hasta la cola del embalse de Entrepeñas, muestra en la primera y tercera campaña un máximo local de velocidad entre las estaciones cuarta y quinta, para luego descender hasta el final del tramo. La campaña en que el caudal circulante era más alto presenta ciertas discrepancias frente a este comportamiento, fundamentalmente debido a dos factores: el aumento de la rugosidad del cauce sumergido en la cuarta estación y la presencia de la cola del embalse de Entrepeñas en las inmediaciones de la quinta y última estación de toma de muestras. Los valores de la velocidad de la corriente entre estaciones consecutivas muestran tendencias y valores muy similares a los ya descritos anteriormente para las tres primeras estaciones. Sin embargo, a partir de este punto las alteraciones de la velocidad son significativas, sobre todo en la cuarta estación de la tercera campaña, que registra un máximo local de velocidad de $2,29 \text{ m s}^{-1}$.
- *Tiempo medio.* Es prácticamente el mismo para las campañas realizadas con los dos caudales más altos. En la campaña realizada con el caudal más bajo el tiempo medio es considerablemente mayor que en el resto de campañas.
- *Área de las secciones transversales del cauce sumergido.* Las áreas de las secciones aumentan con el caudal y, para un estado de flujo concreto, varían de forma inversamente proporcional a la velocidad media, función de la rugosidad del canal. Especialmente significativo resulta el aumento del área de flujo registrado en las últimas estaciones de la segunda y tercera campañas experimentales, debido a la presencia de la cola del embalse de Entrepeñas, que ralentiza el flujo y hace aumentar el área transversal del flujo.
- *Anchura de la curva.* El tiempo de tránsito para concentraciones superiores a la mitad de la concentración del máximo fue propuesto por Taylor como un parámetro informativo acerca de la dispersión que ha experimentado la mancha de trazador. La anchura de la curva aumenta con la distancia al punto de inyección. En cuanto a la influencia del caudal se aprecia el mismo efecto que el ya comentado para el tiempo medio. En las dos campañas

realizadas con un régimen de caudal alto, presentan valores muy similares de este estadístico. Sin embargo, en la campaña en la que el caudal es más bajo, la anchura de la curva es mayor para cualquier estación de muestreo.

b) Coeficiente de dispersión

El conjunto de valores obtenidos para los coeficientes de dispersión permite resaltar los puntos fundamentales:

- Los coeficientes calculados por los métodos de Taylor, Concentración Máxima y Concentraciones Iguales aumentan, con tendencia semejante, con la distancia al punto de inyección. La influencia de un aumento en el caudal se pone de manifiesto si se comparan los resultados obtenidos en las campañas realizadas con caudales bajo y medio. Sin embargo, existen pocas diferencias entre los valores obtenidos en las campañas realizadas con caudales medio y alto.
- El método del Cambio de Momento se ha aplicado a las curvas de trazador para comprobar tanto la dispersión experimentada por el trazador entre el punto de inyección y cada una de las estaciones de toma de muestras, como entre puntos de muestreo consecutivos. El conjunto de valores obtenidos por aplicación del primero de ellos ha permitido definir, en cuanto a características dispersantes y diluyentes, dos subtramos: El primero contiene la zona comprendida entre el punto de inyección y la tercera estación de toma de muestras. Los coeficientes de dispersión presentan una evolución aproximadamente lineal con la distancia al punto de inyección. El segundo abarca desde la tercera estación hasta el final del tramo, en la cola del embalse de Entrepeñas. El comportamiento mostrado por los coeficientes de dispersión en este subtramo es más complejo. Los cambios de la velocidad de la corriente ocasionan variaciones en las condiciones de flujo y dispersión, como ha podido comprobarse en el estudio de las varianzas y los tiempos medios, y también afectan a los coeficientes de dispersión, que aumenta entre la tercera y quinta estación y tras pasar por un máximo disminuye. La aplicación del método de los momentos entre estaciones de muestreo consecutivas pone de manifiesto, de forma mucho más clara, las variaciones en las condiciones locales de flujo. Los valores de los coeficientes de dispersión se ven afectados por las variaciones de la velocidad y presentan los valores más altos en la cuarta estación, donde las velocidades son elevadas, y disminuyen bruscamente al final del tramo estudiado donde, en las proximidades de la cola del embalse, el flujo se ralentiza.
- Si se compara el conjunto de valores obtenidos con el método de Cambio de Momento frente a los otros métodos de trazadores (métodos de Taylor,

Concentraciones Iguales y de la Concentración Máxima) se ponen de manifiesto dos hechos: los valores de los coeficientes proporcionados por estos tres métodos son, en todos los casos, menores que los procedentes de los métodos de Cambio de Momento. Las diferencias entre estos valores disminuyen con la distancia al punto de inyección. La explicación para ambos comportamientos se encuentra en que los tres primeros métodos fueron diseñados para distribuciones gaussianas, como las que se obtienen en los ensayos de dispersión realizados en tuberías y otras conducciones, que no sostienen flujos tan complejos y variables como los ríos. Como ya se ha indicado, en los ensayos de trazadores realizados en corrientes naturales, la morfología gaussiana se adquiere paulatinamente. Así, las curvas recogidas en estaciones próximas a la estación de inyección suelen ser fuertemente sesgadas y esta asimetría hace que la anchura de la curva a una concentración igual a la mitad de la máxima se corresponda con la de una gaussiana de menor tiempo de tránsito, esto es, menos dispersa, lo que lleva a una infravalorización del coeficiente de dispersión. El paso del tiempo y el aumento de la distancia recorrida hacen que las distribuciones de trazador se hagan más simétricas y las diferencias en los valores de los coeficientes de dispersión proporcionados por los diferentes métodos se hacen menores.

Las correlaciones empíricas que mejores resultados ofrecen son las correlaciones de Sánchez, Liu y Fischer. De estas tres correlaciones utilizadas, las propuestas por Sánchez y Liu son las que mejores resultados proporcionan, ya que sus valores son los más próximos a los obtenidos a partir de distribuciones de trazador independientemente de la campaña y estación de muestreo que se consideren. En todos los casos, la fuente más importante de los errores se debe a que la causa fundamental de la dispersión longitudinal es la variación transversal de las velocidades de la corriente, que no puede ser descrita mediante una caracterización hidráulica basada en parámetros globales como la anchura de la corriente, la pendiente del fondo del canal o la velocidad media.

1.3. Dispersión en embalses

El movimiento del agua en lagos y embalses resulta de un conjunto complejo de interacciones entre los aportes energéticos que éstos reciben y la disipación debida a las fuerzas viscosas. Las fuentes más importantes de energía cinética turbulenta son la tensión ejercida por el viento en la superficie y los flujos debidos a los cambios de densidad del agua, ocasionados por la transferencia de energía térmica. Existen otras fuentes energéticas tales como la entrada de ríos afluentes, las

descargas de agua, las corrientes, los manantiales sumergidos o los flujos geotermales, pero su relevancia es mucho menor.

Los procesos de mezcla que estos movimientos originan, tanto superficiales como internos, son propios de cada embalse y dependen de la forma y del tamaño del vaso, de la exposición al viento y de la distribución interna de densidades. Además de estos factores, en embalses de gran tamaño ha de tenerse en cuenta la rotación de la Tierra debido al efecto de la aceleración de Coriolis, Wetzel, 1975.

1.3.1. Fuerzas impulsoras de transporte y mezcla

Todos los procesos de transporte y mezcla en medio hídrico, con excepción de la difusión molecular, son impulsados por fuerzas externas. Estos fenómenos resultan de la interacción de esas fuerzas externas con las propiedades intrínsecas del sistema, tales como la morfología del embalse o la estabilidad de la columna de agua. Siguiendo con la tradición física se ha distinguido aquí, entre energía térmica y energía mecánica, esta última dividida, a su vez, en energía cinética y energía potencial.

a) Energía Térmica. Balance de calor en embalses

El balance de calor de un embalse tiene por objeto definir su respuesta térmica integrada a las condiciones meteorológicas. El balance de calor para un embalse no cubierto por el hielo puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$Q_T = R + L_e + K \quad [4.29]$$

Donde Q_T representa el cambio de la energía calorífica almacenada en el cuerpo del embalse, que equivale a la suma algebraica de los intercambios mediante radiación (R), conducción (K) y evaporación (L_e) efectuados con la atmósfera.

El contenido en energía térmica de un embalse es función fuertemente dependiente de su profundidad media, excepto en embalses estratificados donde esta magnitud está condicionada de forma fundamental por la profundidad de la termoclina. La termoclina aísla las aguas profundas, que constituyen la hipolimnion, de las fuentes superficiales de calor y reduce en gran medida la transferencia de energía a estas capas. La energía calorífica almacenada en el embalse puede obtenerse, de forma aproximada, como producto de la temperatura por la profundidad media, en embalses no estratificados, o por la profundidad de la termoclina, en embalses estratificados. En estos últimos, la contribución energética de la hipolimnion, exceptuando embalses muy profundos, no llega a superar el 20% del total.

La radiación neta recibida en la superficie del embalse se puede expresar mediante la ecuación,

$$R_{net} = R_i - R_{refl} + R_{La} - R_{Le} \quad [4.30]$$

Donde R_i y R_{refl} representan las energías de radiación visible de onda corta incidente y reflejada y R_{Le} y R_{La} son la radiación de onda larga emitida y absorbida.

La radiación solar atraviesa la atmósfera con escasa absorción pero con una considerable dispersión y es reflejada por la superficie del agua, o absorbida en la capa superficial de agua. La absorción de luz en la capa superficial del agua viene dada por la siguiente expresión:

$$R_0 = (1 - r_f) \beta R_{sol} \quad [4.31]$$

Donde R_{sol} es la radiación solar incidente, r_f es el coeficiente de reflexión y β es el factor de absorción superficial, cuyo valor es 0,4, Dake y Harleman, 1969.

La radiación restante, no absorbida en la superficie, penetra en la lámina de agua y atenúa su intensidad con la profundidad a causa de la dispersión y de la absorción que experimenta. La energía absorbida se transforma en calor y aumenta la temperatura del agua. La atenuación de la luz con la profundidad sigue una ley de extinción exponencial, la ley de Lambert-Beer, que viene dada por la siguiente ecuación:

$$R_z = (1 - r_f)(1 - \beta) R_{sol} e^{-\eta z} \quad [4.32]$$

Donde η es el coeficiente de extinción total, que tiene en cuenta la absorción de radiación por el agua y la atenuación debida a las partículas en suspensión o por compuestos coloreados disueltos, Åberg y Rodhe, 1952. El valor global del coeficiente de extinción puede ser calculado a partir de los coeficientes de extinción del agua pura, sólidos suspendidos y clorofila, Bannister, 1974, o a partir de la Profundidad de Secchi, profundidad a la que un disco blanco hecho descender desde una zona de la superficie del agua situada a la sombra desaparece de la vista, Osgood, 1984.

La radiación emitida por el agua de los embalses presenta longitudes de onda larga (infrarrojo lejano) a causa de su temperatura relativamente baja. Esta emisión puede ser cuantificada mediante la ley de Stefan-Boltzmann, cuya forma recoge la siguiente ecuación:

$$R_s = \sigma_s \varepsilon_s T_s^4 \quad [4.33]$$

Donde σ_s es la constante de Stefan-Boltzmann, ε_s es la emisividad de la superficie del agua (0,975) y T_s es la temperatura de la superficie del agua.

La radiación de onda larga emitida por la atmósfera responde a la siguiente expresión:

$$R_a = (1 - r_a) \sigma_s \varepsilon_a T_a^4 \quad [4.34]$$

Donde r_a es la reflexión de radiación infrarroja en la superficie del agua, que tiene un valor típico de 0,03, σ_s es la constante de Stefan-Boltzmann, T_a es la temperatura absoluta del aire y ε_a es la emisividad atmosférica, para cuyo cálculo se han propuesto diferentes expresiones, Idso y Jackson, 1969, Swinbank, 1963 y Brutsaert 1975.

El intercambio de energía por radiación entre el embalse y su entorno presenta un resultado neto favorable para el medio hídrico, a causa de la diferencia de intensidades y longitudes de onda incidente y emitida. Los calores sensible y latente, por el contrario, suponen pérdidas importantes y son, en última instancia, los responsables de los periodos de enfriamiento que experimenta el embalse durante la estación fría.

La transferencia de calor sensible entre el agua contenida en los embalses y la atmósfera tiene lugar por combinación de mecanismos de conducción y convección. El calor es intercambiado a través de la superficie del agua por conducción. Este fenómeno, que sólo se produce en una lámina de agua de escaso espesor conocida como capa límite, depende del gradiente térmico existente en la frontera entre ambos medios. Experimentos de laboratorio han demostrado que la capa conductora tiene un espesor aproximado de 0,13 cm en el agua y 0,40 cm en el aire. Más allá de estas regiones, el calor es transferido por procesos convectivos turbulentos, tanto en el aire como en el agua. El intercambio de calor latente en la superficie del embalse viene dada por la siguiente expresión:

$$K = \rho_a C_p f(u_a)(T_s - T_a) \quad [4.35]$$

Donde ρ_a es la densidad del aire, C_p es el calor específico del aire, T_s es la temperatura de la superficie del agua, T_a es la temperatura del aire a 10 m de altura y $f(u_a)$ es la función de velocidad del viento que responde a las expresiones propuestas por, *Hondzo y Stefan, 1993* y *Ford y Stefan, 1980*.

Con el mismo fin se han propuesto otras expresiones como la recogida por *Fischer et al., 1979*:

$$S = C_s \rho_a C_p u_a (T_s - T_a) \quad [4.36]$$

Donde C_s es el coeficiente que incorpora las variaciones en las condiciones ambientales, C_p es el calor específico del aire, T_s es la temperatura de la superficie del agua, T_a es la temperatura a una altura de 10 m sobre la superficie del agua. El valor del coeficiente C_s está influenciado por las condiciones meteorológicas y

varía desde $0,8 \times 10^3$, para condiciones muy estables, hasta $1,6 \times 10^3$, en condiciones muy inestables, *Hicks, 1972, Friebe y Schmidt, 1976, TVA, 1972*.

La evaporación es una de las contribuciones más importantes a la pérdida de calor en embalses. El alto calor de vaporización del agua debe ser suministrado por la energía almacenada en el embalse, con lo que el poder refrigerante de la evaporación es muy considerable. La velocidad del proceso de vaporización depende directamente del gradiente de presión de vapor a través de la frontera aire-agua. Este fenómeno presenta ciertas analogías con la transferencia de calor sensible, ya que se produce en unas pocas capas de moléculas de la superficie del agua y, en el medio aéreo, afecta sólo a la capa límite del aire. Por encima de esta lámina de aire, el viento y la mezcla vertical arrastran el vapor formado y mantienen el gradiente de presión de vapor. Dada la naturaleza de los mecanismos de eliminación del vapor, el proceso de evaporación se ve favorecido por condiciones atmosféricas inestables.

La medida directa de la evaporación y de la transferencia de calor sensible es bastante difícil y requiere una monitorización continua de la velocidad del viento, de las temperaturas del aire y del agua y de la humedad. El mantenimiento de un programa de seguimiento de estas variables es costoso, por lo que es frecuente usar como aproximación al problema la relación de Bowen, definida como la relación entre la transferencia de calores sensible y latente. El intercambio de energía mediante calor latente en la superficie ha sido estudiado ampliamente, así lo demuestra el gran número de expresiones desarrolladas a tal fin, *Fischer et al, 1979, Hicks, 1972, Friebe y Schmidt, 1976, TVA, 1972, Brutsaert, 1982*. En los cálculos se utilizan como datos de partida diferentes parámetros: densidad del aire, calor latente de vaporización del agua, humedad específica a la presión de saturación a la temperatura de la superficie del agua, humedad específica sobre la superficie del agua y coeficientes que son función de la velocidad del viento y de las variaciones en las condiciones ambientales.

El calor fluye a través del fondo del embalse en respuesta a los cambios estacionales de temperatura. La cantidad total de calor involucrada en este tránsito depende, en primer lugar, del intervalo de temperaturas cubierto por el agua en contacto con el fondo y, en menor medida, de las propiedades térmicas de los sedimentos y rocas del fondo. La magnitud del intercambio sólo se hace apreciable en embalses poco profundos, y aún en estos el balance neto anual es aproximadamente cero.

b) Energía Potencial

La energía potencial de un embalse puede definirse, de acuerdo con la siguiente expresión, como:

$$E_p = mgh = \int_0^{Z_m} gzA(z)\rho(z,t)dz \quad [4.37]$$

Donde m es la masa total de agua contenida en el embalse, g es la aceleración de la gravedad, h es la cota del centro de masas del embalse, $A(z)$ es el área superficial del embalse a cota z , $\rho(z,t)$ es la densidad del agua a cota z y tiempo t y Z_m es la máxima cota del agua. El datum o nivel de referencia para todas estas cotas es el punto más bajo del fondo del embalse. La densidad del agua puede calcularse mediante la ecuación propuesta por Chen y Millero, 1977, dada por las siguientes expresiones

$$\rho^p = \frac{\rho^0}{1 - \frac{P}{K}} \quad [4.38]$$

$$\rho^0 = b_1 + b_2T + b_3T^2 + \dots + b_7T^6 + (b_8T + b_9T^2)S \quad [4.39]$$

$$K = c_1 + c_2T + \dots + c_5T^4 + (c_6 + c_7T + c_8T^2)P + (c_9 + c_{10}T + c_{11}P)S \quad [4.40]$$

Donde ρ^p y ρ^0 son las densidades del agua del embalse a la presión aplicada y a la presión del nivel del mar, respectivamente, T es la temperatura en °C y S es la salinidad, expresada como:

$$S = 0,9951437g_T \quad [4.41]$$

Donde g_T es el número total de gramos de sal disuelta en un kg de agua. Los valores de g_T que normalmente aumentan con la profundidad, tienen la función de reflejar los cambios en la composición del agua del embalse, como las variaciones de concentraciones de sales y nutrientes.

c) Energía Cinética

El agua en lagos y embalses no se encuentra nunca en reposo sino que la acción del viento, los aportes, superficiales o sumergidos, y las variaciones en la concentración de sales disueltas inducen corrientes. Estas corrientes producen importantes fenómenos de mezcla y, finalmente, son detenidas por la fricción interna asociada a estos movimientos, con lo que su energía cinética acaba transformada en calor.

El viento ejerce una acción de arrastre sobre la superficie del embalse. La tensión real que la superficie del agua experimenta está influenciada por la fuerza, las variaciones de la velocidad y el alcance a la exposición del viento, la estabilidad

de la capa límite meteorológica, el grado de desarrollo de las olas y de la energía disipada por éstas en la superficie. De todas estas influencias, el factor dominante es la velocidad del viento.

La tensión que el viento ejerce sobre la superficie del agua lleva asociada un flujo energético desde la atmósfera hacia la interfaz aire-agua que, a 10 m de altura sobre la superficie del agua, viene dado por la siguiente expresión:

$$P = C_D \rho_a u_a^3 \quad [\text{Wm}^{-2}] \quad [4.42]$$

Sólo una pequeña fracción χ de toda esta energía, aproximadamente el 1 o 2%, se transfiere a la superficie del agua y está disponible para los fenómenos de mezcla de la capa superficial, Denman y Miyake, 1973. El flujo efectivo de energía cinética que entra en el embalse viene dado por:

$$P_s = \gamma C_D \rho_a u_a^3 = \eta u_a^3 \quad [\text{Wm}^{-2}] \quad [4.43]$$

donde $\eta = \gamma C_D \rho_a$ presenta valores típicos comprendidos entre 1 y $5 \cdot 10^5 \text{ kg m}^{-3}$.

1.3.2. Mezcla en la capa superficial

La epilimnion sometida a la acción del viento no está siempre bien mezclada con respecto a la densidad, sino que existe una cierta estabilidad permanente ($N^2 \neq 0$). En tales casos, la mezcla puede ser descrita mediante un proceso análogo a la difusión y el coeficiente de difusión turbulento vertical correspondiente puede ser estimado asumiendo que, a cada profundidad, una fracción constante γ_m de la energía cinética turbulenta producida por el viento se incorpora al flujo de flotabilidad $J_b = -\epsilon_z N^2$. La dependencia de K_z con la energía del viento viene dada por:

$$\epsilon_z = \gamma_m \left(\frac{\rho_a C_D}{\rho} \right)^{3/2} \frac{u_a^3}{N^2 kh} \quad [\text{m}^2 \text{ s}^{-1}] \quad [4.44]$$

Kullenberg et al., 1973, han demostrado que la difusión vertical de trazador realmente sigue esta expresión y que si no existen otros datos disponibles puede considerarse como una estimación realista de la difusividad diapicnal en la epilimnion.

Los flujos superficiales de flotabilidad positiva representan otra fuente importante de energía cinética turbulenta que puede resultar de un enfriamiento, de un aumento de la salinidad debido a la evaporación en aguas salinas, o de una combinación de ambos procesos. El proceso de convección se inicia con el hundimiento de parcelas de agua más densas de la superficie después de que la

columna de agua ha sobrepasado un cierto grado de inestabilidad. Las plumas descendentes implican la existencia simultánea de plumas ascendentes, que garanticen la continuidad del medio, con lo que la capa superficial se ve sometida a un intenso proceso de mezcla. El efecto de mezclado impulsado por la convección se evalúa mediante un coeficiente de difusión efectivo ϵ_z definido mediante la siguiente expresión:

$$K_z = k u_f H \quad [4.45]$$

donde k es un coeficiente de proporcionalidad cuyo valor ha de determinarse experimentalmente.

1.3.3. Mezcla en aguas profundas

La termoclina actúa como una cubierta protectora para las aguas hipolimnías contra los efectos provocados por el viento en la superficie. Además, hay normalmente un débil, pero definido, gradiente vertical de densidades que estabiliza la hipolimnion, con lo que no hay suficiente energía cinética disponible como para causar fenómenos de mezcla global, dado que ésta es mucho menor que la energía potencial asociada a la estratificación. Con estos antecedentes, la mezcla vertical esperable en la hipolimnion es poco significativa, quizá sólo a nivel molecular. Sin embargo, y aunque la hipolimnion forma un cuerpo muy estable con números de Richardson característicos bastante elevados, en ocasiones se producen fenómenos de mezcla vertical relativamente vigorosos. La única explicación para esta aparente contradicción está en que deben existir mecanismos de concentración de la energía que permiten que, localmente y de forma ocasional, aumente la intensidad de la energía y se produzcan fenómenos de mezcla, Thorpe, 1977. Esta mezcla es desigual, poco uniforme, intermitente y rápidamente colapsa bajo la acción de la flotabilidad, una vez que la energía que la ocasionó se ha disipado. Después de colapsar, las zonas mezcladas se elongan y entrelazan entre sí y con los alrededores para originar una estructura vertical de densidad escalonada.

La energética de esta mezcla no ha podido ser explicada en detalle todavía, pero parece claro que la fuerza impulsora fundamental es la energía cinética suministrada por el viento y por los flujos que entran en el embalse. Este aporte energético induce movimientos y ondas internas con escalas que varían desde unos pocos cm hasta el tamaño del vaso del embalse y que no originan mezcla de forma directa, sino a través de sus interacciones en la hipolimnion.

Los estudios experimentales realizados sobre la distribución de trazadores naturales o artificiales en lagos con una estructura térmica vertical bien definida conducen a los siguientes resultados:

- El coeficiente de difusión vertical del calor varía entre los valores típicos de los coeficientes de difusión molecular y $10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$.
- Los coeficientes de difusión vertical del calor y de otros trazadores son aproximadamente iguales.
- Los coeficientes de difusión vertical son, generalmente, mayores en periodos de vientos fuertes o de flujos de entrada y/o salida significativos.
- Los perfiles verticales de temperatura o trazador son estructurados y muestran escalas típicas que varían entre unos pocos centímetros y 10 m.
- El coeficiente de difusión vertical normalmente decrece cuando aumenta la estabilidad de la estratificación.

La dependencia de la difusión turbulenta y la intensidad de la estratificación, a través de la frecuencia de estabilidad, se establece mediante una expresión que relaciona el coeficiente K_z con el cuadrado de la frecuencia de Brunt-Väisälä con la siguiente forma:

$$K_z = a(N^2)^{-b} \quad [\text{m}^2 \text{s}^{-1}] \quad [4.46]$$

Se han establecido diferentes valores del exponente en función del mecanismo de producción de la turbulencia, como la disipación de energía de movimientos a gran escala ($b = 1,0$) o los gradientes de velocidad ($b = 0,5$).

Esta misma relación ha sido utilizada por otros autores como *Colman y Armstrong, 1987*, o *Garrett, 1984*, que han propuesto para el parámetro a , función del nivel general de turbulencia, valores comprendidos entre 0,4 y 0,6, aunque los valores extremos del intervalo se encuentran, aproximadamente entre 0,2 y 2,0.

Ford y Stefan, 1980, han correlacionado a con el área superficial de los lagos (A_s) y han propuesto la siguiente expresión:

$$a = 8,17 \cdot 10^{-4} (A_s)^{0,56} \quad [4.47]$$

La medida directa de la difusión turbulenta vertical en lagos y embalses resulta compleja debido a la naturaleza tridimensional del campo de difusión. Este hecho ha provocado que frecuentemente se recurra a otras técnicas, como el seguimiento de la evolución temporal de determinadas propiedades escalares, como la temperatura o la concentración de una sustancia concreta, para la estimación de ϵ_z . Basados en esta idea, Powell y Jassby, 1974, propusieron la siguiente expresión para el cálculo del coeficiente de difusión turbulento vertical:

$$\varepsilon_z = \frac{\int_{sed}^z A(z') \frac{\partial C}{\partial t}(z') dz'}{A(z) \frac{\partial C}{\partial z}(z)} \quad [4.48]$$

Donde C es la concentración de la sustancia utilizada como referencia y $A(z)$ es el área superficial del lago, como función de la profundidad. Este mismo coeficiente ha sido calculado por Garret, 1984, en lagos a partir de perfiles verticales de temperatura, para lo que ha propuesto una expresión con la siguiente forma:

$$\varepsilon_z = \frac{\frac{\partial}{\partial t} \left[\int_0^z T(\zeta) d\zeta \right] + wT \Big|_0^z - \int_0^z Q d\zeta}{\frac{\partial T}{\partial z}} \quad [4.49]$$

Donde $T(z,t)$ es la distribución de temperaturas medidas, z es la coordenada vertical con origen en el fondo del lago o embalse, t es el tiempo, w es la componente vertical de la velocidad y Q es el término de las fuentes internas de calor, la absorción de radiación solar y el intercambio con los sedimentos.

El método propuesto por Garrett presenta el inconveniente de necesitar la determinación cuidadosa de todas las fuentes de energía, Hondzo y Stefan, 1993, sin embargo sus tres ventajas fundamentales: la simplicidad de la realización de las medidas experimentales, no necesitar suposiciones adicionales y que el método de cálculo del coeficiente implica realizar una promediación temporal, le han convertido en el método más utilizado.

El coeficiente de difusión vertical en una lámina de agua donde existe una cierta estabilidad fue relacionado con la disipación de energía cinética turbulenta para producir energía potencial por Ozmidov, 1965, que propuso una expresión con la siguiente forma:

$$\varepsilon_z = \gamma_m \frac{\delta}{N^2} \quad [m^2 s^{-1}] \quad [4.50]$$

Donde γ_m representa la eficacia de la mezcla y que, para mezcla inducida por la acción del viento en el hipolimnion de lagos, se ha encontrado que presenta un valor de 0,12, Ivey e Imberger, 1991. Diversos autores, Osborn, 1980; Oakey, 1982; Gregg, 1987, han utilizado este tipo de relación para el estudio de la difusión vertical en la hipolimnion, sin embargo ha de tenerse en cuenta que la aplicación de esta expresión implica asumir implícitamente una distribución uniforme de los fenómenos de mezcla en la columna de agua.

Una aproximación alternativa a las vistas hasta aquí, aunque con el mismo fundamento, puede realizarse asumiendo que, como media, el embalse completo

está en equilibrio con las entradas de energía del exterior y que la disipación de energía puede ser calculada mediante la siguiente expresión;

$$\varepsilon_z = \frac{P_e A_s + \frac{dE_p}{dt}}{V} \quad [\text{Wm}^{-3}] \quad [4.51]$$

Donde P_e es la potencia por unidad de superficie proporcionada por el viento, E_p es la energía potencial de la masa de agua y V es el volumen del embalse. A partir de esta ecuación para la disipación de la energía, el coeficiente de difusión turbulenta vertical puede expresarse de forma aproximada como, *Fischer et al, 1979*:

$$\varepsilon_z = \frac{P_e A_s + \frac{dE_p}{dt}}{V} \frac{1}{N^2} \quad [\text{m}^2 \text{s}^{-1}] \quad [4.52]$$

Imberger y Patterson, 1981, han propuesto un método de cálculo del coeficiente de difusión turbulento vertical basado en la aplicación de argumentos dimensionales a la interacción entre fenómenos localizados de mezcla y los subsiguientes ajustes gravitacionales que tienen lugar. De acuerdo con este método, el coeficiente puede ser expresado en función de P_v , la potencia proporcionada por el viento sobre la superficie del embalse, P_s , la potencia introducida por los flujos de corrientes afluentes, y E_{pbc} la energía potencial bloqueada por la estratificación, mediante la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_z = a \frac{H^2 (P_v + P_s)}{E_{pbc} S_c} \quad [\text{m}^2 \text{s}^{-1}] \quad [4.53]$$

Donde a es una función dependiente de la forma del vaso del embalse, de la estratificación y de la estabilidad S_c , para el que *Imberger y Patterson, 1981*, han propuesto un valor constante de 0,048, siempre y cuando la hidrografía del lago no sea muy distorsionada. Los aportes energéticos correspondientes al viento y a las corrientes afluentes se responden con las siguientes expresiones:

$$P_s = g \Delta \rho D Q \quad [4.54]$$

$$P_v = C_s A_{NS} u_a \quad [4.55]$$

Donde $\Delta \rho$, D y Q son el salto de densidad, el nivel de flotabilidad y el caudal del río afluente, u_a es la velocidad del viento y C_s es un parámetro que incorpora el coeficiente de fricción y un factor que representa el grado de abrigo de la superficie respecto al viento.

1.4. Resultados de campañas en embalses

El objeto de la elaboración de resultados es conocer la estructura de densidades de la lámina de agua contenida en el embalse durante el tiempo en que se han realizado las campañas experimentales. El estudio de la estructura pondrá de manifiesto las variaciones en la estabilidad de la columna de agua con el tiempo transcurrido entre cada una de las campañas, así como los cambios que se producen en la capacidad dispersante del medio hídrico.

La elaboración de resultados en las diferentes campañas experimentales incluye:

- Cálculo de los perfiles de densidad. La densidad se ha determinado a partir de los perfiles experimentales de temperatura y conductividad por la correlación de Chen y Millero, que proporciona la densidad del agua en función de la presión, la temperatura y la concentración de sales disueltas, ecuaciones [4.38-4.40]. La concentración salina del agua se ha estimado a partir de los perfiles de conductividad medidos y del calibrado del conductivímetro.
- Cálculo del perfil vertical de frecuencias de Brunt-Väisällä, en este informe denominada frecuencia de estabilidad. Esta frecuencia es una medida de la estabilidad vertical de la columna de agua y, por tanto, de la mayor o menor facilidad que tienen los aportes externos de energía cinética turbulenta para originar procesos de mezcla, y está definida por la ecuación:

$$N^2 = - \left(\frac{\partial \rho}{\partial z} \right) \frac{g}{\rho} \quad [4.56]$$

- Cálculo del perfil vertical de coeficientes de difusión turbulenta. Los coeficientes dependiendo de las características de la columna de agua se han calculado mediante las ecuaciones: [4.44],[4.49] y [4.53]. En los embalses que experimentan estratificación, las características de la difusión vertical en el periodo no estratificado pueden ser evaluadas en función de los ligeros cambios de densidad que se producen entre la superficie y el fondo del embalse. Estos cambios causan una cierta estabilidad en la lámina de agua aunque sin delimitar capas de dinámica inconexa. Estas condiciones son asimilables a una capa única en la que se desarrolla un proceso de mezcla impulsado por la energía depositada por el viento en la superficie del embalse y dificultado por la estabilidad debida a los cambios verticales de densidad. El coeficiente de difusión vertical se calcula a partir de un balance energético planteado para toda la columna de agua en estado estacionario, según el cual la energía eólica se transforma en energía potencial, al mezclar capas de agua de diferente densidad. El estado estratificado, por el contrario, la aparición de planos de muy elevada estabilidad picnométrica divide, de forma efectiva, la columna de agua en dos

zonas, prácticamente aisladas respecto al intercambio de materia. Este estado obliga a considerar capas separadas para el estudio de las condiciones de difusión. La capa superficial, directamente afectada por los agentes meteorológicos, recibe un tratamiento idéntico al aplicable a embalses no estratificados, mientras que el tratamiento de la hipolimnion resulta más complejo. El cuerpo principal del embalse, debido a su elevado tiempo de residencia, presenta características similares a los lagos y la estimación del coeficiente de difusión vertical puede realizarse mediante el método propuesto por Garret, 1984, ecuación [4.49], un balance de energía basado en los cambios espacio-temporales de la temperatura en la hipolimnion, y desarrollado por Hondzo y Stefan, 1991.

La aplicación de esta misma expresión a las zonas del embalse con bajo tiempo de residencia es posible, aunque carece de sentido físico. Este método se basa en un exhaustivo control de las fuentes de energía, que permita determinar el calor difundido y, a través de este, el coeficiente característico del proceso. Sin embargo, en zonas de bajo tiempo de residencia, el agua fluye sin que el calor radiante absorbido quede reflejado en la elevación de temperatura del agua, dado que ésta se desplaza en un tiempo muy inferior al transcurrido entre campañas experimentales consecutivas. Este hecho impide la utilización del método empleado en los embalses con alto tiempo de residencia, ya que necesariamente conduciría a resultados incoherentes, que nada tienen que ver con las condiciones reales de difusión en el embalse. En su lugar, se ha utilizado un método propuesto por Imberger y Patterson, 1981, ecuación [4.53], según el cual el coeficiente de difusión turbulento vertical es función del aporte energético recibido, de la estabilidad de la columna de agua a cada profundidad y de la energía potencial bloqueada por la estratificación.

1.4.1. Embalse de Sobrón

Los datos meteorológicos necesarios para el cálculo de las magnitudes aquí relacionadas se han obtenido del Instituto Nacional de Meteorología y de la central nuclear Santa María de Garoña.

a) Perfiles de densidad y frecuencia de estabilidad

En todas las campañas realizadas, la densidad del agua aumenta con la profundidad en todos los puntos de medida, excepto en el punto de medida más alejado y situado aguas arriba de la descarga de la central nuclear en el que la densidad permanece constante. Si bien, los valores de densidad, la forma de sus perfiles verticales y los gradientes que presenta esta magnitud con la profundidad dependen de la época del ciclo anual en que se han realizado las medidas experimentales y del punto de medida considerado. En todas las campañas, la densidad del agua en la zona de la des-

carga de la central nuclear presenta los valores más bajos. Como ejemplo de los perfiles de densidad calculados en el embalse de Sobrón, en la figura 4.2 se muestra el perfil de densidad calculado para la campaña realizada el día 30 de noviembre de 2001.

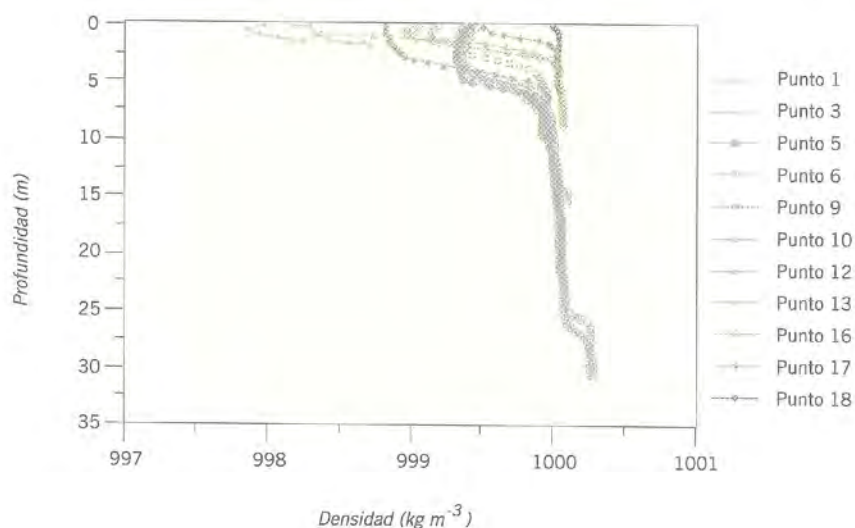


Figura 4.2.
Perfiles verticales
de densidad en el
embalse de
Sobrón. Campaña:
30/11/01.

Dadas las características del embalse y la época del ciclo anual en el que se realizaron las medidas, el día 30 de noviembre de 2001 el embalse no debería presentar estratificación natural. Los perfiles se pueden agrupar en cinco tipos.

- Los perfiles correspondientes a la zona del embalse más próxima a la presa y de mayor profundidad, puntos 1, 3 y 5, en la figura 4.2, presenta cinco capas de agua con diferente comportamiento que incluyen dos termoclinas. Hasta una profundidad de 4 m, se extiende una capa bien mezclada. Entre los 4 y 8 m de profundidad, se desarrolla una termoclina bien definida. Debajo de esta termoclina, hasta una profundidad de 25 m, se extiende una capa de agua bien mezclada que queda interrumpida por una segunda termoclina de 2 m de espesor, más débil que la anterior. El resto de la lámina de agua, hasta el fondo del embalse, presenta densidad constante. Es de destacar que los perfiles de los tres puntos de medida se superponen, debido a la gran uniformidad longitudinal que presenta la masa de agua contenida en esta zona.
- Los puntos 6 y 9, en la gráfica de la figura 4.2, se encuentran situados entre el puente de Tobalinilla y la descarga de la central nuclear Santa María de Garoña. Esta zona corresponde a la zona en donde se abre el desfiladero del Sobrón y es la más ancha del embalse. La profundidad de esta zona es menor que la de la zona más próxima a la presa. Los perfiles muestran que

la lámina de agua se estructura en tres capas. La capa de agua más superficial, 2 - 3 m de espesor, que se encuentra bien mezclada. Inmediatamente debajo, se sitúa una termoclina menos marcada que en la zona próxima a la presa del embalse. Por debajo de esta termoclina, la densidad del agua permanece constante. En esta zona no existe homogeneidad longitudinal y la densidad disminuye a medida que el punto de medida se encuentra situado más próximo a la descarga de la central nuclear.

- Alrededor del avenamiento de la descarga de la central nuclear, se realizaron medidas en cinco puntos. En la figura 4.2 se muestran los perfiles medidos en tres de ellos, puntos 10, 12 y 13 en la figura. Conviene destacar que las densidades medidas en esta zona presentan los valores más bajos de los medidos en el resto del embalse, debido a que el agua descargada por la central nuclear se encuentra a mayor temperatura que la que ocupa el embalse originariamente. En esta zona, la densidad aumenta de una forma constante con la profundidad hasta el fondo del embalse. Al ser una zona próxima a la margen del embalse, la profundidad es pequeña, alrededor de 2 m. En el centro del vaso la profundidad alcanza los 8 m y se observa una termoclina igual a la observada en los perfiles de los puntos 6 y 9.
- Aguas arriba de la descarga de la central nuclear, puntos 16 y 17, en la gráfica de la figura 4.2, se pueden diferenciar dos capas en la lámina de agua. Una capa superior en la que la densidad aumenta con la profundidad y otra más profunda en la que la densidad se mantiene constante con la profundidad. En la capa superior no existe homogeneidad horizontal y la densidad aumenta a medida que el punto de medida se encuentra situado más alejado de la descarga de la central nuclear. En la capa inferior existe uniformidad horizontal.
- El punto 18 es el punto situado aguas arriba de la descarga de la central nuclear y más alejado de ésta. El perfil de densidad es totalmente plano. La densidad medida en este punto es la más alta del embalse y coincide con la de las capas más profundas del resto de los perfiles.

Los perfiles de frecuencia de estabilidad son coherentes con los de densidad. Los perfiles de frecuencia presentan oscilaciones debidas a la alta sensibilidad de este parámetro a pequeños cambios en la densidad del agua. Las oscilaciones que presentan los perfiles de frecuencia de estabilidad son pequeñas, salvo en las zonas del embalse en las que se ha desarrollado algún grado de estratificación. Como ejemplo, en la figura 4.3 se muestra el perfil de frecuencia de estabilidad calculada para el punto 1 en la campaña realizada el día 30 de noviembre de 2001.

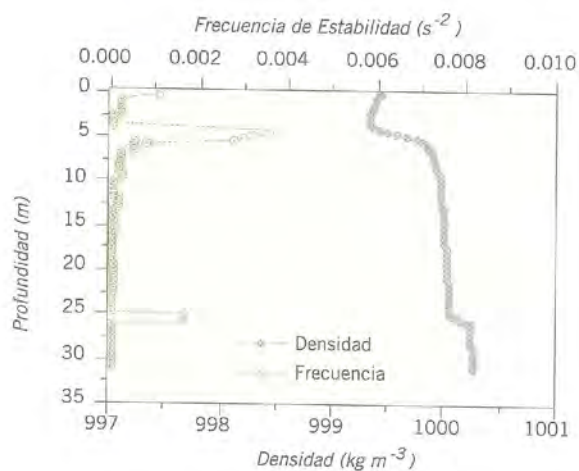


Figura 4.3. Perfiles verticales de densidad y frecuencia de estabilidad en la zona próxima a la presa de Sobrón. Campaña: 30/11/01.

Salvo en tres capas de la lámina de agua, en las que se observa un aumento de estabilidad, los perfiles de frecuencia de estabilidad calculados en la campaña realizada el día 30 de noviembre de 2001 indican la alta inestabilidad de la columna de agua, con valores que oscilan entre 10^{-3} y 10^{-5} s^{-2} . Las capas que presentan mayor estabilidad se sitúan en superficie y a 4 y 25 m de profundidad. El aumento de frecuencia de estabilidad es menor en las capas superior e inferior que en la intermedia.

La división del embalse en zonas, que se ha establecido en función del tipo de los perfiles de densidad obtenidos el día 30 de noviembre de 2001, también, se puede establecer sobre la base de las medidas obtenidas en el resto de las campañas. Los límites de cada zona son los mismos en todas las campañas.

Sobre la base de los cometarios realizados, se puede establecer que el agua que se descarga de la central nuclear flota sobre el agua del embalse aguas arriba y aguas abajo del avenamiento de la descarga. Aguas arriba, el efecto del vertido se manifiesta hasta una distancia del avenamiento que puede variar de unas campañas a otras, dependiendo del régimen de las centrales hidroeléctricas instaladas en el río Ebro, aguas arriba del tramo que se estudia y de la operación de la propia central nuclear. Aguas abajo, la descarga origina una estratificación artificial que se hace patente hasta la presa del embalse. En la zona más próxima a la presa se produce estratificación natural durante el verano y parte del otoño. No obstante esta estratificación no afecta a la dispersión del vertido ya que la termoclina natural se desarrolla a mayor profundidad que la artificial y el agua que proviene de la central nuclear viaja por la capa más superficial de la lámina de agua.

b) Coeficientes de difusión turbulenta vertical

Los coeficientes de difusión vertical son de ordenes de magnitud que oscilan entre 10^{-7} y 10^{-2} $m^2 s^{-1}$.

Las termoclinas presentes en la lámina de agua presentan los valores de coeficientes de difusión más bajos, si bien en ningún caso son inferiores a $10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Los coeficientes de difusión en las termoclinas artificiales presentan valores que dependen de la época del año y de la posición del punto de medida, pero en general, en aquellas campañas en que existe estratificación natural, los valores del coeficiente de difusión son algo mayores que los de la termoclina natural.

Si no se consideran las termoclinas artificiales, los coeficientes de difusión más altos se encuentran en la capa superficial de la lámina de agua, del orden de 10^{-4} y $10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, los valores más altos aparecen en la capa más superficial de la lámina de agua debido a la acción mezcladora del viento. Para una misma campaña, no se aprecian variaciones importantes entre los diferentes puntos de medida. En las capas situadas por debajo de las termoclinas, los valores de los coeficientes de dispersión son menores que los de la capa superficial y salvo excepciones puntuales, permanecen constantes con la profundidad.

1.4.2. Embalse de Puentelarrá

Según se comentó en el apartado de Campañas de campo, el embalse de Puentelarrá presenta uniformidad vertical en cualquier época del año. Los perfiles verticales de densidad, frecuencia de estabilidad y coeficiente de difusión vertical son planos. Los valores de estos parámetros son similares a los calculados en la capa superficial de agua en el punto más próximo a la presa del embalse del Sobrón.

1.4.3. Embalse de Entrepeñas

El análisis de los parámetros que establecen la dinámica del embalse muestran que el embalse de Entrepeñas tiene homogeneidad vertical durante los meses de diciembre a marzo. Esta dinámica se cumple en las tres zonas del embalse que se definieron en el análisis de resultados experimentales. La única diferencia en el comportamiento de las tres zonas se encuentra en la profundidad a que se origina la termoclina. Los datos meteorológicos para el cálculo de las magnitudes aquí relacionadas se han obtenido del Instituto Nacional de Meteorología y de la central nuclear de Trillo.

a) Perfiles de densidad y frecuencia de estabilidad

A modo de ejemplo en la figura 4.4 se muestran varios ejemplos de los perfiles de densidad y frecuencia de estabilidad calculados para las zonas alta y media del embalse en la campaña realizada en el mes de marzo. Las características de la lámina de agua muestran un perfil homogéneo de densidades y frecuencia de estabilidad en todos los puntos de muestreo utilizados. Los valores de la densidad, prácticamente idénticos, se encuentran comprendidos entre $999,83$ y $999,98 \text{ kg m}^{-3}$, en la super-

ficie y entre 1.000,08 y 1.000,16 kg m⁻³, en las zonas profundas próximas al fondo del cauce. La diferencia vertical de densidades presenta, por tanto, un valor comprendido entre 0,18 y 0,26 kg m⁻³ y permite afirmar que las condiciones de la columna de agua son aproximadamente uniformes. En el cuerpo principal del embalse los perfiles presentan la misma morfología.

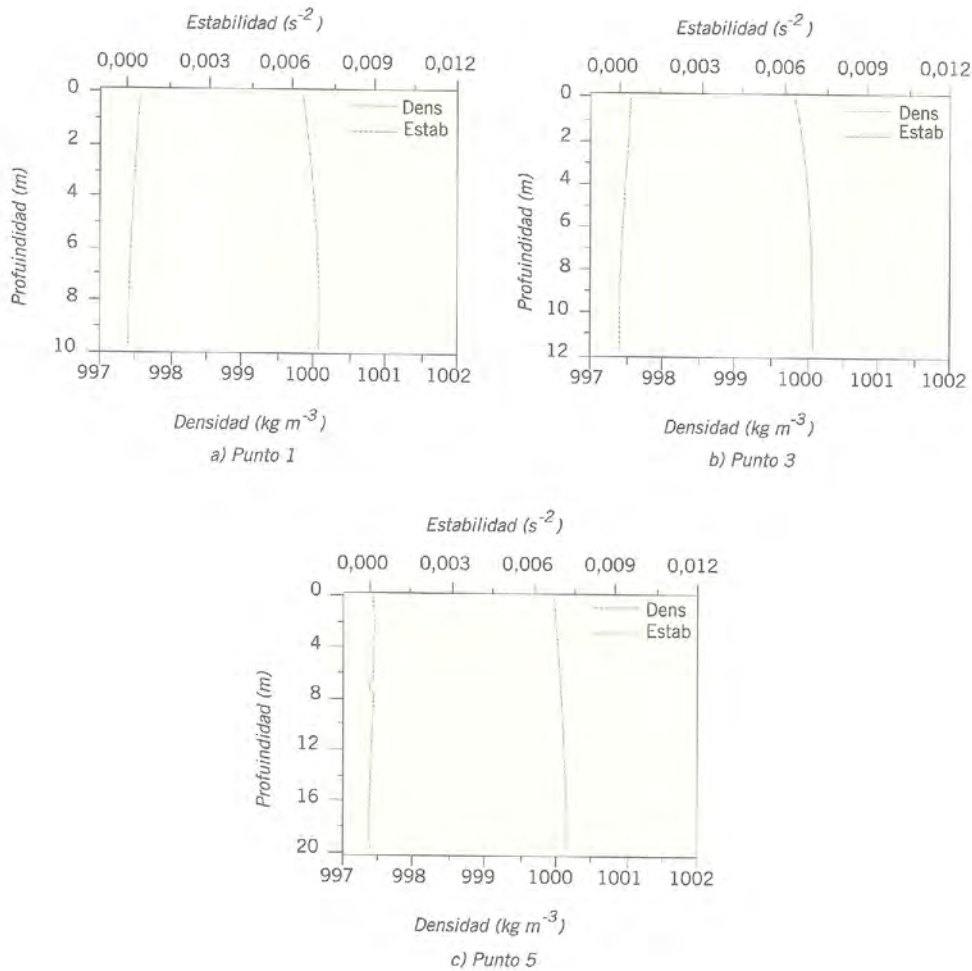
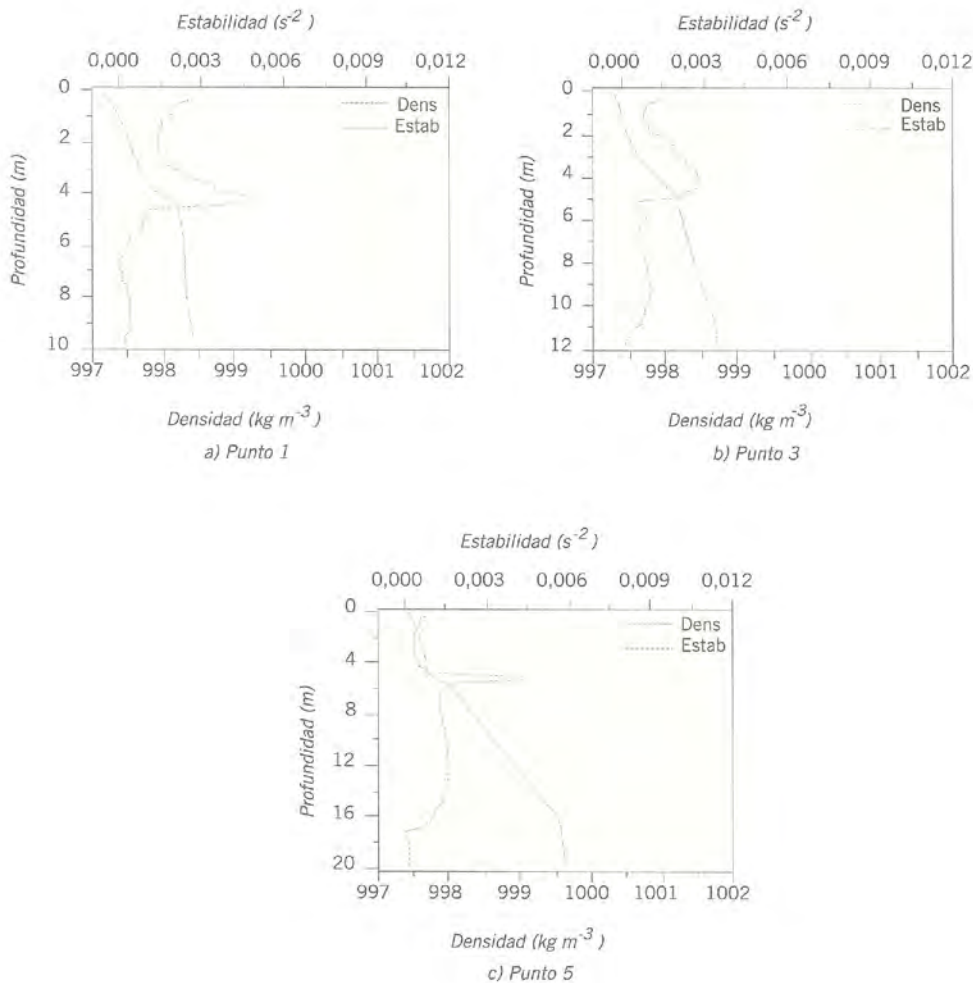


Figura 4.4. Perfiles verticales de densidad y frecuencia de estabilidad en las zonas alta y media del embalse de Entrepeñas. Campaña: 17/03/98.

Los efectos que el calentamiento tiene sobre densidad del agua se muestra en la figura 4.5 que muestra los perfiles calculados para la campaña realizada en el mes de julio. Esta representación pone de manifiesto las siguientes propiedades de la lámina de agua:

- El intercambio de calor con la atmósfera ha ocasionado una disminución de la densidad que puede registrarse en toda la columna. La diferencia

Figura 4.5. Perfiles verticales de densidad y frecuencia de estabilidad en las zonas alta y media del embalse de Entrepeñas. Campaña: 15/07/98.



de densidades entre la superficie y el fondo, que alcanza un valor máximo de 2,14 kg m⁻³ en el último punto de esta zona, tiene un valor medio de 1,60 kg m⁻³, lo que implica un cambio significativo respecto al estado homogéneo. Estos resultados indican que durante la estación cálida el agua del embalse ha disminuido su densidad y que este fenómeno es más evidente en la superficie, que soporta el intercambio de energía con el medio, que en el fondo.

- La variación de la densidad con la profundidad no es progresiva, como ponen de manifiesto los perfiles de la frecuencia de estabilidad. Si se toman los máximos de este parámetro como punto de referencia para segmentar la lámina de agua, pueden establecerse tres capas de propiedades diferentes. Estas capas se corresponden con la epilimniom, metaliniom e hipolimniom.

- La frecuencia de estabilidad presenta variaciones locales importantes debidas a la transmisión vertical del calor absorbido. A estas variaciones de estabilidad también contribuye un vertido de mayor concentración salina que el medio receptor, que fue detectado en esta campaña experimental. La morfología de estos perfiles ha puesto de manifiesto que los máximos gradientes de densidad se localizan a profundidades similares, entre 4 y 5 m, para todos los puntos y que presentan valores comprendidos entre $2,82 \times 10^{-3}$ y $4,80 \times 10^{-3} \text{ s}^{-2}$. El ligero aumento de estabilidad que puede observarse cerca de la superficie se debe a la alta absorción de energía radiante en el primer metro de la columna de agua sin que se produzca transmisión vertical del calor. Este efecto se muestra más marcado en el primer punto donde, por su mayor proximidad a la cola del embalse, la concentración de sólidos en suspensión es más alta.

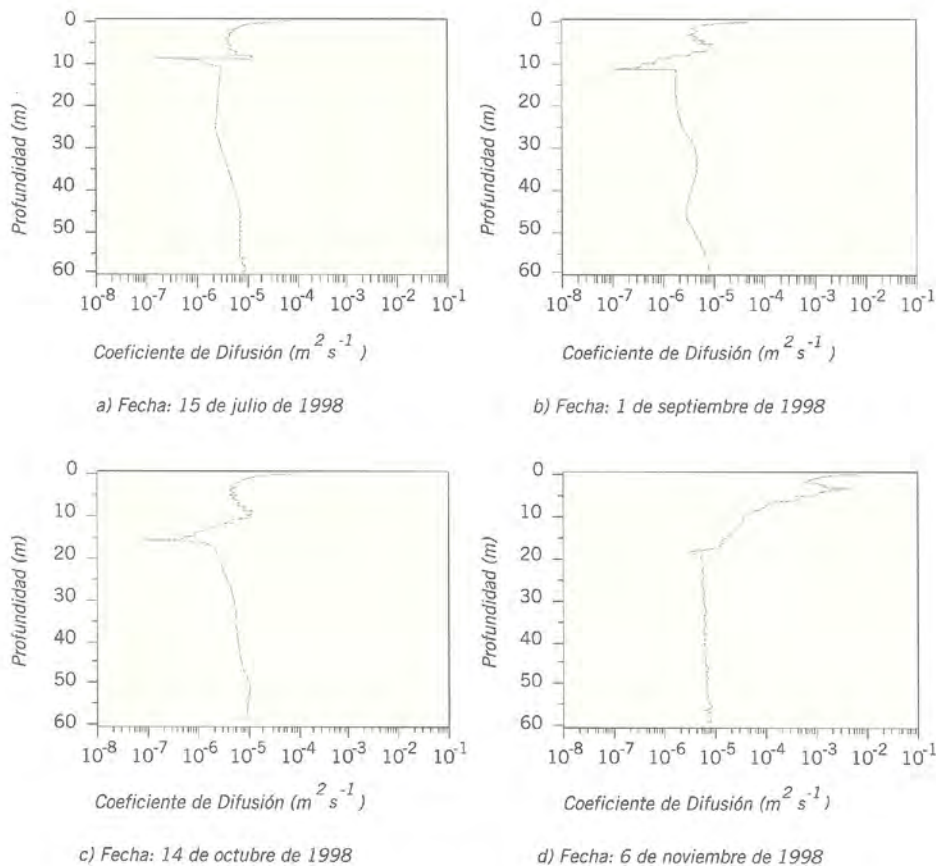
Esta misma estructura de la columna de agua se observa en el resto de puntos de medida del embalse en la campaña realizada en el mes de julio. En la zona media y cuerpo principal del embalse la termoclina se encuentra más profunda, 10 m, y la frecuencia de estabilidad ha aumentado a 0,006 y 0,007 s^{-2} en la zona media y cuerpo principal, respectivamente.

b) Coeficientes de difusión turbulenta vertical

Los perfiles verticales de difusión se encuentran marcados por la época del ciclo anual en el que se ha realizado la campaña de campo. Durante la parte del ciclo anual en que el embalse se encuentra en estado de libre circulación, los coeficientes verticales de difusión presentan valores comprendidos entre órdenes de magnitud entre 10^{-3} y $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Los coeficientes disminuyen con la profundidad en cualquier sección del embalse. En las zonas media y cuerpo principal del embalse, que presentan mayor profundidad que la zona alta, la disminución continuada del coeficiente de difusión hace que en sus capas más profundas se alcancen los valores más bajos de toda la masa de agua.

En la época de estratificación y en todo el embalse los valores del coeficiente de difusión se mantienen en valores altos, órdenes de $10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ en la capa superficial de agua, epilimnion. A la profundidad en la que se encuentra situada la termoclina, el coeficiente experimenta una brusca disminución alcanzando valores del orden de los coeficientes correspondientes a la difusión molecular, 10^{-8} - $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, por debajo de la termoclina el coeficiente de difusión vuelve a aumentar hasta valores del orden de 10^{-7} - $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. A modo de ejemplo, la figura 4.6 muestra el perfil de coeficientes calculados para el punto más próximo a la presa en diferentes campañas.

Figura 4.6.
Perfil vertical del
coeficiente de difu-
sión turbulenta en
el punto de medi-
da más próximo
a la presa de
Entrepeñas.



1.4.4. Embalse de Bolarque

Los datos meteorológicos para el cálculo de las magnitudes aquí relacionadas se han obtenido del Instituto Nacional de Meteorología y de la central nuclear de Trillo.

a) Perfiles de densidad y frecuencia de estabilidad

La elevada longitud del embalse de Bolarque, junto con las diferencias en la salinidad del agua contenida en el mismo, hacen que éste presente variaciones significativas de sus propiedades en el sentido longitudinal.

La zona del embalse definida por los tres primeros puntos de muestreo, zona más próxima al avenamiento del agua que procede del embalse de Entrepeñas, presenta estados verticales uniformes. Esta situación se corresponde con perfiles de densidad y estabilidad prácticamente uniformes, como puede apreciarse en la fig. 4.7 a, que muestra los resultados proporcionados por el perfil medido en el punto 2. Los aumentos longitudinales de la temperatura y la conductividad eléctrica tienen efectos contrapuestos sobre los valores medios de la densidad del agua que, en su conjunto, experimenta un descenso en esta zona desde $1000,02 \text{ kg m}^{-3}$, calculados para el punto 1, hasta $999,96 \text{ kg m}^{-3}$, que se determinaron en el pun-

to 3. El ligero aumento de la estabilidad que se pone de manifiesto cerca de la cota de fondo en el punto 2 se debe a un incremento de la conductividad de $24 \mu\text{S cm}^{-1}$ en el último metro de columna de agua.

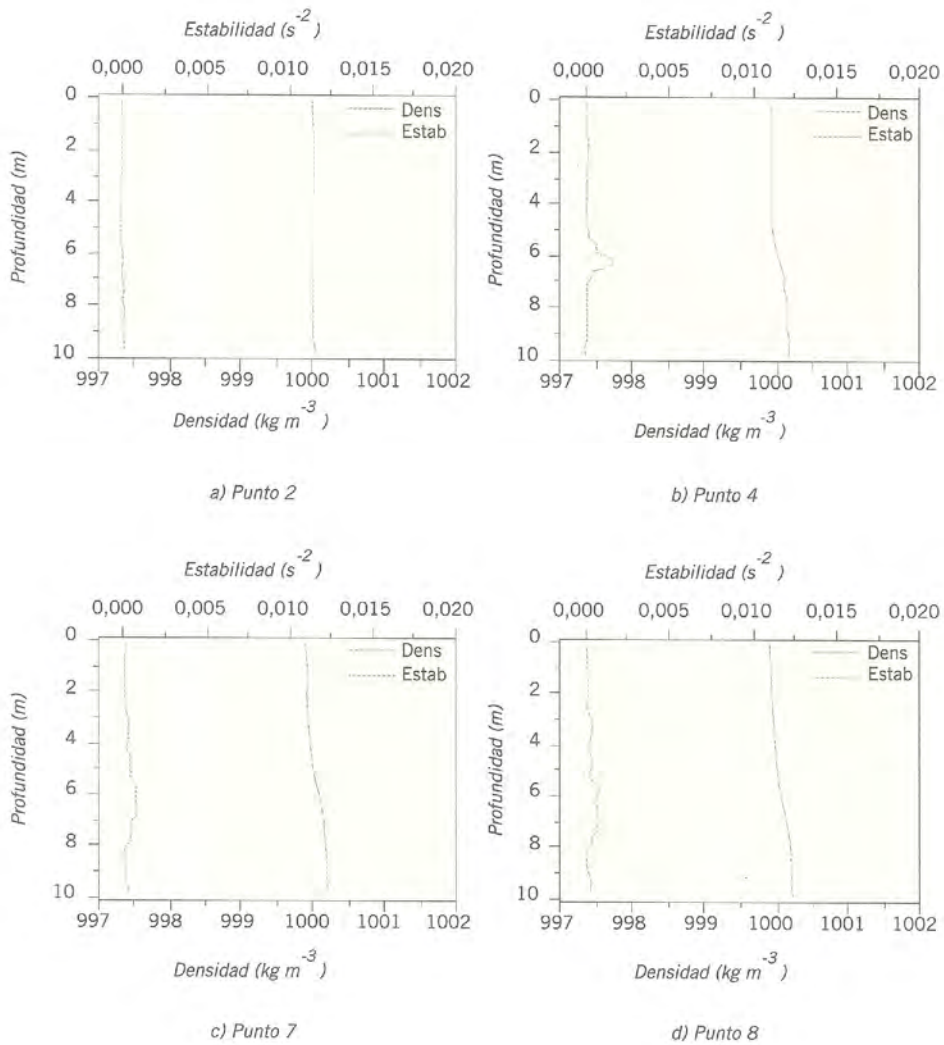


Figura 4.7. Perfiles verticales de densidad y frecuencia de estabilidad en embalse de Bolarque. Campaña: 14/04/98.

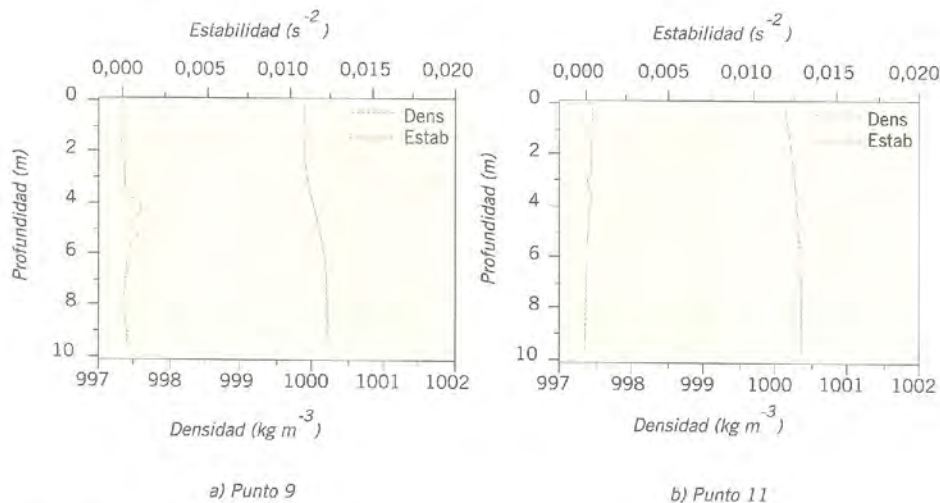
Aguas abajo de esta primera zona, en el resto del curso del río Tajo, las características de la lámina de agua cambian como se refleja en la picnoclina de los perfiles correspondientes a los puntos 4 y 7, como recogen las figuras 4.7 b y c. Los perfiles de densidad calculados en ambos son muy similares con valores superficiales de $999,93 \text{ kg m}^{-3}$ y profundos de $1.000,18 \text{ kg m}^{-3}$. El cambio global registrado, unos $0,25 \text{ kg m}^{-3}$, no se reparte uniformemente en la vertical sino que la parte más importante se concentra entorno los 6 m de profundidad, donde se alcanzan valores máximos del cuadrado de la frecuencia de estabilidad de $1,64 \times 10^{-3} \text{ s}^{-2}$.

El punto 8, emplazado justo frente a la presa del embalse, presentó las mismas características ya vistas para el punto 7 en cuanto a densidades y frecuencias de estabilidad.

El recorrido realizado por el curso del río Tajo mediante los perfiles analizados anteriormente ha puesto de manifiesto que, a medida que el punto de muestreo se aleja de la presa del embalse de Entrepeñas, la mezcla de aguas de diferentes procedencias y el calentamiento debido a la radiación solar provocan la aparición de una cierta estabilidad en la columna de agua.

El resto de los puntos de muestreo recogieron las características del agua contenida en el tramo del río Guadiela comprendido entre el desagüe del embalse de Buendía y la presa del embalse de Bolarque. Para la representación de los perfiles medidos en este tramo se muestran dos figuras, las figuras 4.8 a y b, que corresponden, respectivamente, a los puntos 9 y 11, puntos más próximo a la descarga del embalse de Buendía.

Figura 4.8. Perfiles verticales de densidad y frecuencia de estabilidad en el embalse de Bolarque. Campaña: 14/04/98.



Las mediciones realizadas en estos puntos responden a las siguientes características cuanto más cercano está el punto de muestreo a la presa del embalse de Buendía:

- Menor es la mezcla de aguas de diferente procedencia, lo que minimiza la aparición de estabilidades debidas a variaciones en la concentración salina.
- El tiempo disponible para el intercambio energético con el medio es más bajo, por lo que los efectos de estabilidad debidos a causas térmicas se hacen menos significativos.

Estas dos causas permiten explicar que el máximo de la frecuencia de estabilidad tiene menor valor en el punto 9 ($5,79 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$) que en los anteriores y se

localiza a menor profundidad (3,6 m). En el punto 11, la columna de agua vuelve a ser homogénea en sentido vertical y presenta los valores más altos de densidad, $1.000,14 \text{ kg m}^{-3}$ en la superficie y $1.000,37 \text{ kg m}^{-3}$ cerca del fondo, por su menor temperatura y mayor concentración en sales disueltas.

Durante la época del ciclo térmico anual correspondiente a la estratificación de embalses se crea una segmentación horizontal que se produce durante el periodo estratificado y que resulta de los efectos combinados de las estratificaciones térmica y química. Ambas estratificaciones se ponen de manifiesto desde el primer punto de medida. Los saltos de temperatura y conductividad medidos en este punto, $91 \mu\text{S cm}^{-1}$ y $3,3 \text{ }^\circ\text{C}$, proporcionaron un incremento de densidad entre la superficie y el fondo de $0,78 \text{ kg m}^{-3}$ al mismo tiempo que ocasionan la aparición de un plano de máxima estabilidad a 2,6 m de la superficie, con una frecuencia de Brunt-Väisälä de $5,88 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$.

El resto de los puntos de medida situados en el antiguo cauce del río Tajo muestran variaciones verticales de la conductividad, y sobre todo de la temperatura, más altas, que ocasionan un aumento de la estabilidad de la columna de agua, especialmente marcada en aquellos planos en los que los tránsitos térmico y químico coincidentes proporcionan valores altos de la frecuencia de estabilidad.

El recorrido longitudinal del embalse permite comprobar que el plano de máxima estabilidad emerge a medida que el punto de muestreo se sitúa más cercano a la presa del embalse. La razón para esta observación experimental se halla en que cuanto más próximo se encuentra el punto de medida de la descarga del embalse de Buendía, mayor es el espesor de la lámina de agua que proviene del río Guadiela.

b) Coeficientes de difusión turbulenta vertical

El estado de mayor homogeneidad de los medidos en el embalse de Bolarque corresponde a la campaña experimental realizada en el mes de marzo de 1999.

Los resultados más significativos extraídos del análisis de estos perfiles son los siguientes:

- Los perfiles de los coeficientes de difusión varían en sentido vertical de forma inversamente proporcional a la profundidad, con la excepción de algunas láminas de agua que presentan una estabilidad ligeramente superior a la media, que presentan una clara desviación respecto a este comportamiento y en las que se alcanzan los valores más bajos del coeficiente en cada perfil.
- La evolución longitudinal de los perfiles de coeficientes de difusión pone de manifiesto la mezcla de aguas de diferentes concentraciones salinas que tienen lugar en el embalse de Bolarque. La zona que contiene el salto de

salinidad queda marcada por una quimioclina débil, que registra los valores más bajos del coeficiente de difusión.

- El resto de los perfiles correspondientes al curso del río Tajo presentan características similares entre sí y definen una capa superficial de entre 3 y 5 m de profundidad con valores algo más altos del coeficiente de difusión que se encuentran comprendidos entre $2,81 \times 10^{-4}$ y $6,55 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, en la superficie, y $1,88 \times 10^{-6}$ y $3,63 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, en las proximidades de la quimioclina.
- Los puntos correspondientes al cauce del río Guadiela han mostrado el máximo de la frecuencia de estabilidad cerca de la superficie del agua, por lo que los perfiles del coeficiente de difusión vertical han presentado una variación inversa con la profundidad más o menos clara. Los valores extremos calculados para estos coeficientes han variado entre $2,36 \times 10^{-4}$ y $2,18 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, en la superficie, y entre $2,52 \times 10^{-5}$ y $3,41 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ cerca de la cota de fondo. Estos datos ponen de manifiesto que las condiciones de difusión en diferentes puntos de muestreo son mucho más similares en profundidad que en la superficie.

A medida que avanza el ciclo anual, la columna de agua gana en estabilidad y se produce una separación de capas. Las condiciones de difusión en cada una de estas capas están controladas por los gradientes de densidad que registran y por las oscilaciones verticales de la frecuencia de estabilidad, pero la necesidad de considerar por separado sus condiciones dinámicas viene dado por el plano de muy alta frecuencia que las separa.

Las características exhibidas por estos perfiles han permitido diferenciar dos zonas en el embalse. La primera de ellas contiene los 11 primeros puntos, todos ellos muestran variaciones importantes en la difusividad vertical de la lámina de agua. La segunda sólo contiene el punto 12, el más próximo a la descarga del embalse de Buendía.

Los perfiles de la primera zona presentan las siguientes características: Presenta tres capas que corresponden a la epilimnion, metalimnion e hipolimnion.

Los perfiles de densidad y estabilidad del punto 12 han mostrado una total uniformidad de la columna de agua, como consecuencia de la cual la difusividad del medio varía de forma inversamente proporcional con la profundidad, habiendo mostrado valores extremos comprendidos entre $4,30 \times 10^{-4}$ y $2,02 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

1.4.5. Embalse de Zorita Hidráulica

El análisis que se expone a continuación estudia las condiciones dinámicas del embalse en Zorita Hidráulica en función de los perfiles de densidad, frecuencia de estabilidad y coeficientes de difusión turbulenta vertical calculados a partir de los

datos proporcionados por las campañas experimentales. En el análisis de la dinámica del embalse, debe considerarse que el agua del embalse es utilizada por la central nuclear José Cabrera como foco frío, lo que supone un importante aporte de calor ajeno al intercambio con la atmósfera. La distribución vertical de la energía térmica procedente de ambas fuentes puede presentar diferencias significativas dado que, mientras la energía solar se reparte verticalmente en función del coeficiente de extinción de la luz en el agua, el agua caliente descargada por la central nuclear, por su menor densidad, queda depositada exclusivamente en la superficie. Los datos meteorológicos para el cálculo de las magnitudes aquí relacionadas se han obtenido del Instituto Nacional de Meteorología y de la central nuclear José Cabrera.

a) Perfiles de densidad y frecuencia de estabilidad

Las campañas horizontales realizadas en el embalse de Zorita Hidráulica han permitido segmentar el embalse longitudinalmente en tres zonas de acuerdo con el comportamiento observado.

Zona Alta. La primera zona del embalse se extiende sobre una longitud aproximada de 6.500 m, tomando como referencia la descarga de la presa de Bolarque, y contiene los tres primeros puntos utilizados en las campañas horizontales. Los perfiles verticales de densidad y frecuencia de estabilidad en este tramo presentan un estado del embalse prácticamente homogéneo con mínimas diferencias de densidad entre el fondo y la superficie. Los perfiles de la frecuencia de estabilidad, cuyo valor máximo es inferior a $0,001 \text{ s}^{-2}$, no muestran una lámina de agua con un tránsito total de densidades importante. Las zonas más estables en la columna de agua se presentan próximas la superficie del agua, donde se absorbe la parte más importante de la radiación solar.

Zona Media. La segunda zona se extiende sobre una longitud aproximada de 1.160 m y contiene el tramo del embalse afectado de forma directa por la descarga de la central, que se manifiesta en forma de dos aportes, uno térmico y otro cinético, al medio hídrico. El suministro de cantidad de movimiento presenta un alto grado de disipación local y sólo afecta a las condiciones de dispersión en esta zona de influencia directa.

Las principales características puestas de manifiesto por estos perfiles, figura 4.9, son las siguientes:

- El vertido térmico de la central ocasiona alteraciones importantes de la densidad en zonas próximas a la superficie del agua. Los perfiles de densidad registran un descenso continuado hasta una profundidad variable entre 2 y 3,5 m. Los valores máximos y mínimos de la densidad superficial han sido respectivamente $999,09 \text{ kg m}^{-3}$, correspondientes a la campaña realizada en el mes de mayo, y $998,17 \text{ kg m}^{-3}$, calculados para el mes de julio.

- Las capas profundas del embalse no presentan variaciones apreciables de la densidad con la profundidad ni con la evolución del ciclo anual. Este comportamiento está provocado por la dificultad de transferir en vertical la energía térmica recibida superficialmente. El valor medio de la densidad en el fondo se ha mantenido prácticamente constante entorno a $999,55 \text{ kg m}^{-3}$.
- La descarga térmica de la central provoca que, independientemente de la época del año, el perfil del embalse presente una capa superficial estable. Esta fuente de calor tiene una influencia decisiva en la estratificación, dado que representa un aporte térmico mayor que el procedente del intercambio con la atmósfera.

Zona Baja. La tercera zona abarca el tramo de embalse comprendido entre el final de la zona media y la presa, cuya longitud aproximada es de 890 m. Los mayores efectos térmicos medidos en esta zona corresponden a la campaña realizada a principios del mes de septiembre donde la columna de agua registro los valores mínimos de la densidad superficial y de fondo; $997,23$ y $998,99 \text{ kg m}^{-3}$, en coincidencia con un máximo de la frecuencia de estabilidad, registrado a $1,63 \text{ m}$ de la superficie, que presentó un valor de $0,0095 \text{ s}^{-2}$.

El resto de las campañas realizadas para el seguimiento del ciclo anual han mostrado una atenuación continuada del estado estratificado del embalse que, de forma progresiva, acerca los valores de la densidad de la superficie y del fondo del embalse. Sin embargo, ninguna de las campañas realizadas ha permitido describir un estado homogéneo de la columna de agua del embalse.

b) Coeficientes de difusión turbulenta vertical

Los perfiles de temperatura y conductividad medidos en la zona próxima a la cola del embalse de Zorita Hidráulica han mostrado condiciones aproximadamente uniformes en la lámina de agua. Los cambios, característicos de los perfiles medidos en el embalse de Bolarque, quedan eliminados por el mezclado que se produce cuando el agua circula a través de las turbinas de la central hidráulica. Evitada la posibilidad de estratificación química, y dado que el bajo tiempo de residencia del embalse no permite la formación de estratificación térmica en esta zona, la masa de agua puede ser considerada como una capa única, sin variaciones significativas de la estabilidad entre la superficie y el fondo. Este hecho, comprobado experimentalmente, permite describir la mezcla como un proceso similar a la difusión y en el que coeficiente de difusión vertical puede estimarse a partir de un balance de energía cinética turbulenta en la columna de agua, *Lerman et al., 1995*.

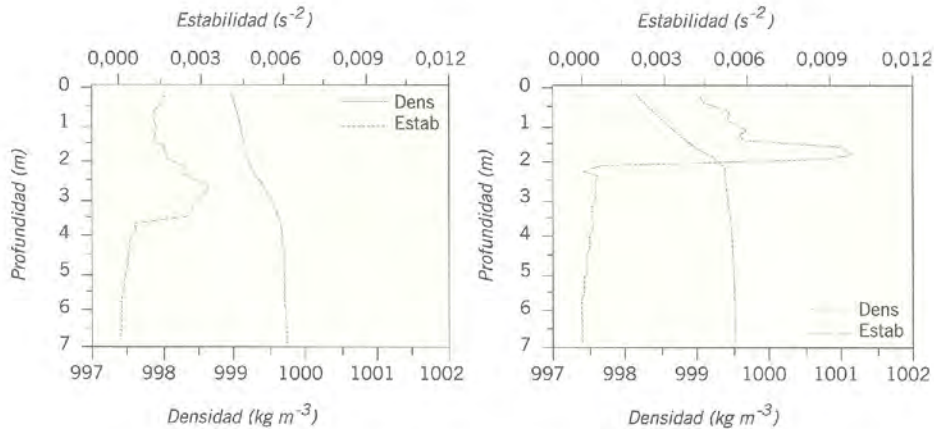
Los límites de la segunda zona se han establecido a partir de los perfiles de temperaturas medidos en las campañas horizontales.

La masa de agua de esta parte del embalse se caracteriza por una elevada estabilidad superficial frente a las aguas más profundas. El cálculo de los coeficientes de difusión vertical ha de considerar dos fuentes de energía disponibles para impulsar procesos de mezcla: la energía depositada por el viento sobre la superficie del agua y aquella procedente de la descarga del agua de refrigeración de la central. El nivel de flotabilidad para la estimación de la energía procedente de la descarga se ha definido a partir de los perfiles de la frecuencia de estabilidad, que marcan claramente el espesor de la lámina de agua afectada de forma directa por la el vertido de la central. El método de cálculo utilizado, propuesto por *Imberger y Patterson, 1981*, ecuación [4.53], se basa en un balance entre las fuerzas impulsoras de la mezcla y la energía potencial bloqueada por la estratificación contra la que han de actuar para producir mezcla en contra del gradiente de densidades.

Los resultados obtenidos ha permitido resaltar los siguientes aspectos:

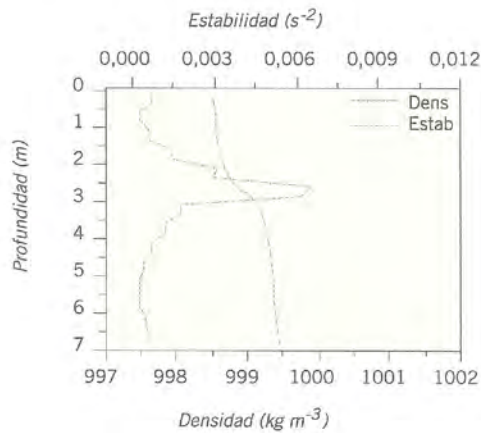
- Los valores del coeficiente de difusión en la capa superficial, $2,12 \times 10^{-5} - 2,57 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, son menores que en las zonas profundas del embalse, $3,03 \times 10^{-4} - 3,42 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Este hecho se debe a la elevada estabilidad que presentan las aguas superficiales, que se ven directamente afectadas por el vertido térmico de la central nuclear.
- Si bien existe una cierta diferencia en el aporte energético recibido por el embalse entre las tres campañas, fundamentalmente debido a las variaciones del nivel de flotabilidad y de la velocidad del viento ($3,37$; $3,11$ y $2,13 \text{ m s}^{-1}$), puede apreciarse claramente que los valores obtenidos evolucionan a lo largo del ciclo anual haciéndose mínimos en la campaña en la que la estratificación térmica alcanza su máxima intensidad, octubre de 1998.
- Los valores más bajos de los coeficientes de difusión turbulenta se localizan en la transición que se produce entre la capa superficial y las aguas profundas, en coincidencia con los valores más elevados de la frecuencia de estabilidad. Los elevados gradientes de densidad calculados para estos planos han proporcionado coeficientes de difusión comprendidos entre $1,08 \times 10^{-5}$ y $1,75 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, de modo que cuanto más intensa es la estratificación más bajos son los coeficientes de difusión.
- Los coeficientes de difusión de las capas profundas aumentan progresivamente de valor a medida que los gradientes de densidad se hacen menos intensos, hasta alcanzar los valores máximos registrados cerca de la cota de fondo.

Figura 4.9. Perfil vertical de coeficientes de difusión turbulenta vertical en el embalse Zorita Hidráulica. Sección del avenamiento del canal de descarga de la central nuclear.



a) Fecha: 8 de mayo de 1998

b) Fecha: 16 de julio de 1998



c) Fecha: 13 de octubre de 1998

La tercera y última zona del embalse presenta normalmente gradientes térmicos verticales marcados. El agua caliente descargada por la central nuclear es transportada hacia la presa por laminación y debido al movimiento de advección del flujo principal y, en su curso, la acción de los agentes externos puede contrarrestar o incrementar los desequilibrios térmicos que presenta la lámina de agua. Las campañas experimentales han puesto de manifiesto la existencia de dos capas en las que el agua presentaba diferentes características:

- La capa superficial que se encuentra en proceso de mezcla en la que el coeficiente de difusión vertical se ha estimado a partir del balance de energía cinética turbulenta igualando los flujos debidos al movimiento medio del embalse y el flujo de flotabilidad, *Lerman et al., 1995*. El coeficiente de difusión en la epilimnion presenta una tendencia general a disminuir con la

profundidad y muestra valores comprendidos entre $1,70 \times 10^5$ y $1,88 \times 10^3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ en la superficie y entre $5,00 \times 10^7$ y $2,00 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, en las inmediaciones de la termoclina

- La capa profunda para la que se ha utilizado la expresión propuesta por *Imberger y Patterson, 1981*, para la hipolimnion de embalse estratificados. Los coeficientes de difusión estimados para la cota de fondo se encuentran comprendidos entre 112×10^6 y $7,09 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

Los valores mínimos del coeficiente de difusión, $3,79 \times 10^8 - 1,87 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, se localizan en la termoclina, que marca el plano de máxima estabilidad de la lámina de agua. Esta elevada estabilidad ocasiona una importante disipación de la energía cinética disponible y provoca una reducción de la eficacia del proceso de mezclado.

1.4.6. Embalse de Almoguera

a) Perfiles de densidad y frecuencia de estabilidad

El embalse de Almoguera, de acuerdo con los trabajos de campo, presenta perfiles de densidad prácticamente uniformes durante el periodo de tiempo comprendido entre los meses de octubre y abril, un periodo excepcionalmente largo, que está de acuerdo con las estimaciones previas realizadas. La homogeneidad de densidades conduce a frecuencias de estabilidad bajas, que favorecen la circulación vertical en la columna de agua, dado que no es necesario actuar contra gradientes de densidad marcados.

Los valores de densidad calculados en las campañas fueron $1,000,04 \text{ kg m}^{-3}$, en la superficie, y $1,000,05 \text{ kg m}^{-3}$, en el fondo.

El perfil de la frecuencia de estabilidad muestra leves alteraciones de la densidad próximas a la superficie, debidas a variaciones locales de la temperatura, aunque no son lo suficientemente importantes como para significar un claro impedimento para el mezclado vertical de la columna de agua bajo la acción de los elementos externos. El máximo de la frecuencia de estabilidad, localizada 2,1 m bajo la superficie, presentó un valor de $5,68 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$.

b) Coeficientes de difusión turbulenta vertical

Las condiciones más favorables para la difusión se producen en la superficie, donde la disponibilidad de energía es mayor. Los valores superficiales de los coeficientes han variado entre $1,49 \times 10^3$ y $1,38 \times 10^3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, en función de la velocidad del viento y de las condiciones de estabilidad superficial. La coincidencia del valor más alto de velocidad ($4,16 \text{ m s}^{-1}$) y de condiciones poco estables en la primera campaña (17 de abril de 1998) son la causa de que los coeficientes de difusión proporcionados por ésta sean los más altos. Bajo la capa superficial, los coeficientes de difusión se mueven en intervalos relativamente estrechos debido al menor flujo energético, que

ha sido atenuado por la columna de agua, y a que los cambios de estabilidad son menos importantes. Los valores de los coeficientes de difusión en las inmediaciones de la cota de fondo han variado entre $6,87 \times 10^5$ y $1,30 \times 10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$.

1.4.7. Embalse de Estremera

Los datos meteorológicos necesarios para el cálculo de las magnitudes aquí relacionadas se han obtenido del Instituto Nacional de Meteorología.

a) *Perfiles de densidad y frecuencia de estabilidad*

Desde el punto de vista de los perfiles de densidad, la lámina de agua del embalse de Estremera muestra un alto grado de homogeneidad. Los mayores gradientes de densidad se han calculado a partir de las medidas realizadas el día 4 de octubre de 2001. La mayor variación de densidad se observa en la capa más superficial de agua y es debido al enfriamiento que experimenta esta capa superficial por intercambio de calor con el ambiente. No obstante, el gradiente es pequeño, el máximo gradiente en el primer metro de profundidad alcanza un valor de $0,023 \text{ kg m}^{-4}$. Para profundidades superiores a un metro, el gradiente es muy pequeño, máximo gradiente $5,66 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^{-4}$.

Los perfiles de estabilidad indican la alta inestabilidad de la columna de agua. Los valores máximos $0,003 \text{ s}^{-2}$ se presentan en la capa más superficial y en la zona de influencia del aporte del arroyo de La Tejera. Este aumento de estabilidad se disipa aguas abajo y arriba de dicho punto. Este comportamiento es general, excepto en la campaña que se realizó el día 4 de octubre de 2001, en que aparecía un segundo aumento de estabilidad en la zona próxima a la presa, máximo que solamente se detectó en esta campaña por lo que se puede considerar puntual. Excepto en la capa superficial, el comportamiento general determinado en todas las campañas, con excepción de la ya mencionada del día 4 de octubre de 2001, indica que la estabilidad relativa presenta pocas oscilaciones y que la frecuencia de estabilidad varía entre ordenes de magnitud de 10^{-3} y 10^{-4} s^{-2} .

b) *Perfiles del coeficiente de difusión vertical*

Los perfiles verticales del coeficiente de difusión vertical presentan oscilaciones que son reflejo de las oscilaciones de la frecuencia de estabilidad. Obviando dichas oscilaciones, la tendencia general, es que el coeficiente de difusión disminuye con la profundidad de tal forma que el valor más alto se presenta en las capas superficiales de agua debido a la acción mezcladora del viento. Los valores del coeficiente de difusión son de ordenes de magnitud que oscilan entre 10^{-6} y $10^{-5} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. En ningún caso éstos presentan valores del orden de la difusión molecular, $10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, por lo que se puede considerar que la lámina de agua se encuentra con un grado de mezcla considerable,

1.4.8. Embalse de Arrocampo

Los datos meteorológicos necesarios para el cálculo de las magnitudes aquí relacionadas se han obtenido del Instituto Nacional de Meteorología y de la central nuclear de Almaraz y se muestran en el apartado de Documentación.

a) Perfiles de densidad y frecuencia de estabilidad

Los valores de densidad calculados son bajos debido a la alta temperatura del agua. La densidad aumenta muy ligeramente con la distancia al canal de descarga de la central nuclear de Almaraz. Los perfiles de la mayor parte de la lámina de agua del embalse son perfiles prácticamente planos, en algunos casos se observa un ligero aumento de la densidad con la profundidad. Una excepción a este comportamiento lo constituye la zona próxima a la presa. En esta zona, para profundidades mayores de 12 m, se produce un aumento de densidad con la profundidad. Dicho aumento de densidad se debe a la acumulación que existe en las capas más profundas de agua, debido a que la descarga del embalse se realiza en la superficie.

La lámina de agua del embalse de Arrocampo presenta una alta inestabilidad en todo el embalse salvo en la zona próxima a la presa. En esta zona hasta una profundidad de 11 m, la columna de agua presenta alta inestabilidad con valores máximos de la frecuencia de estabilidad que oscilan entre 3×10^{-4} y 4×10^{-4} . Por debajo de 11 m existen dos termoclinas bien definidas originadas por la acumulación que se produce en las capas más profundas de agua. En el resto de la lámina, los valores máximos de frecuencia de estabilidad se presentan en la capa más superficial, con valores del orden de $4 \times 10^{-4} \text{ s}^{-2}$.

b) Perfiles del coeficiente de difusión vertical

Los perfiles verticales del coeficiente de difusión vertical presentan oscilaciones que son reflejo de las oscilaciones de la frecuencia de estabilidad. Obviando dichas oscilaciones, la tendencia general, es que el coeficiente de difusión disminuye con la profundidad de tal forma que el valor más alto se presenta en las capas superficiales de agua, debido a la acción mezcladora del viento. En la capa superficial los valores del coeficiente de dispersión presentan valores muy altos, del orden de $10^{-2} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, lo que evidencia el alto grado de mezcla. Por debajo de la capa superficial y salvo en la zona próxima a la presa, los coeficientes de difusión se mantienen constantes en un valor algo menor que en superficie pero que evidencia un alto grado de mezcla. En los perfiles correspondientes a la zona de la presa, se evidencia la presencia de la termoclina, que arroja valores del coeficiente muy próximos a los valores correspondientes a la difusión molecular. En el resto de los puntos de medida se obtienen perfiles semejantes a los descritos para el punto más próximo a la descarga.

1.4.9. Embalse de Torrejón-Tajo

Los datos meteorológicos necesarios para el cálculo de las magnitudes aquí relacionadas se han obtenido del Instituto Nacional de Meteorología y de la central nuclear de Almaraz.

a) Perfiles de densidad y frecuencia de estabilidad

En todas las campañas realizadas, la densidad del agua aumenta con la profundidad en todos los puntos de medida. Si bien, los valores de densidad, la forma de sus perfiles verticales y los gradientes que presenta esta magnitud con la profundidad dependen de la época del ciclo anual en que se han realizado las medidas experimentales y del régimen de funcionamiento de las centrales eléctricas que operan en el embalse. Por ejemplo, en las figuras 4.10 y 4.11, se muestran los perfiles de densidad calculados para las campañas realizadas los días 27 de septiembre de 2001 y 25 de junio de 2002, respectivamente.

Figura 4.10. Perfiles verticales de densidad en el embalse de Torrejón-Tajo. Campaña: 27/09/01.

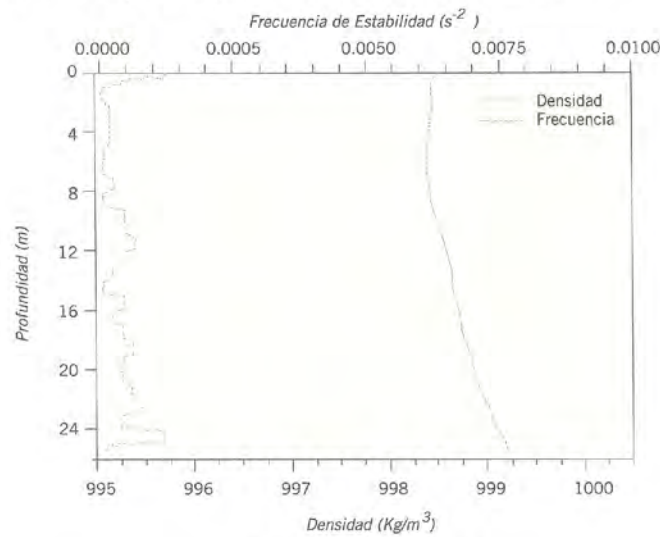
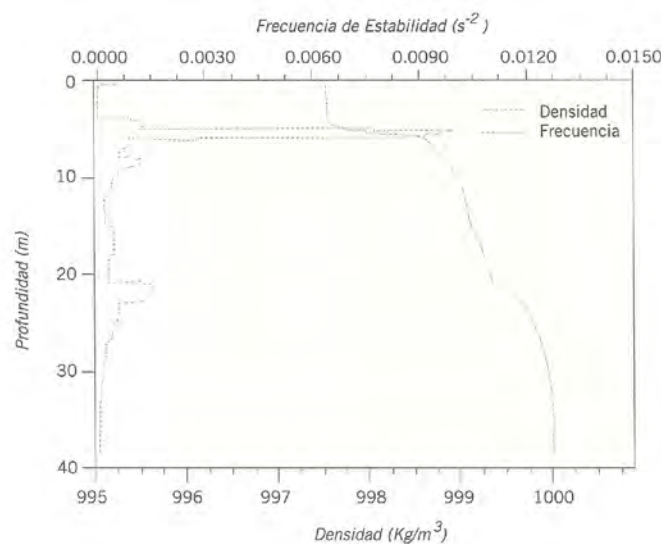


Figura 4.11. Perfiles verticales de densidad en el embalse de Torrejón-Tajo. Campaña: 25/06/02.



El día 27 de septiembre de 2001, la central hidroeléctrica de Torrejón-Tajo se encontraba en operación y el embalse de Arrocampo se encontraba en régimen de recirculación, es decir, ni vertía ni tomaba agua del embalse de Torrejón-Tajo. Por las características del embalse y la época del ciclo anual en el que se realizaron las medidas, el embalse debería presentar estratificación natural. En la figura 4.10 se observa como los perfiles de densidad solamente presentan pequeñas oscilaciones y como todos los valores de densidad a cualquier profundidad son muy próximos, en resumen, el embalse presenta una alta homogeneidad, la máxima diferencia de densidades es de $1,0 \text{ kg m}^{-3}$. La operación de la central hidroeléctrica de Torrejón-Tajo destruye la estratificación natural del embalse. La no-operación de la presa de Arrocampo evita la aparición de estratificación artificial.

El día 25 de junio de 2002, la presa de Arrocampo se encontraba en régimen de recirculación y de vertido al embalse de Torrejón-Tajo. Los gradientes verticales de densidad, figura 4.11 son del orden de 3 kg m^{-3} , tres veces mayores que los obtenidos en la campaña de realizada el día 27 de septiembre de 2001. Este aumento del gradiente de densidad se debe al vertido de agua caliente desde el embalse de Arrocampo, que afecta a todo el embalse excepto al punto más próximo a la presa de Valdecañas, punto 8, en que el gradiente de densidad es de $0,8 \text{ kg m}^{-3}$. En los puntos más próximos a la presa se aprecia un cambio en la pendiente del perfil de densidad, a una profundidad de unos 20 m, debido a una incipiente estratificación natural que no ha sido destruida por la operación de la central hidroeléctrica de Torrejón-Tajo.

Los perfiles de frecuencia de estabilidad cuando no existe estratificación indican la alta inestabilidad de la columna de agua, con valores que oscilan entre $1,8 \times 10^{-3}$ y $3,36 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$, lo que confirma la alta homogeneidad que presentaba la lámina de agua del embalse el día en que se realizaron las medidas. Cuando existe estratificación, dicha estratificación se hace evidente en el aumento de la estabilidad. En la termoclina artificial originada por la descarga del embalse de Arrocampo, la frecuencia de estabilidad alcanza un valor de $9,9 \times 10^{-3} \text{ s}^{-2}$. El máximo de frecuencia de estabilidad debido a la estratificación artificial presenta valores mayores conforme el punto de medida se encuentra más próximo al avenamiento del embalse de Arrocampo. La excepción a este comportamiento lo presenta el punto más próximo a la presa del embalse de Valdecañas, en el que la estabilidad es muy alta y presenta un perfil plano de frecuencias de estabilidad.

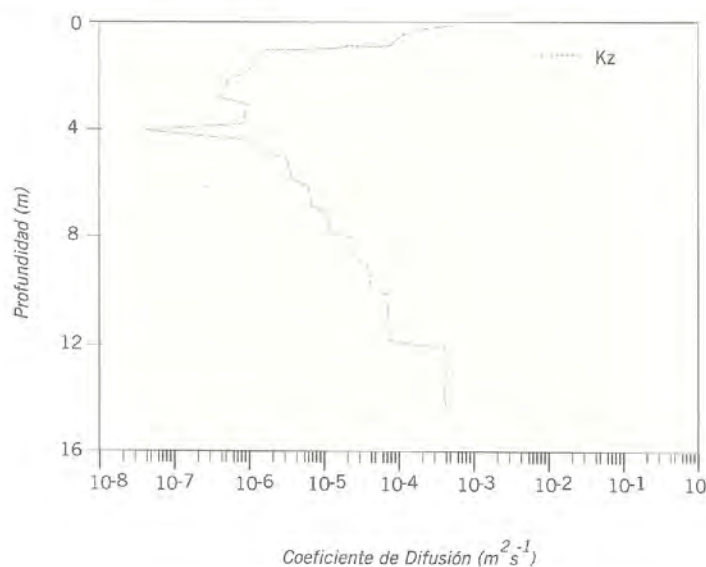
b) Perfiles del coeficiente de difusión vertical

Los coeficientes de difusión vertical tienen valores que oscilan entre 10^{-2} y $10^{-8} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. En general, y en las épocas del año en que el embalse se encuentra en

régimen de mezcla completa o en aquellas zonas del embalse en que no tiene lugar la estratificación, los coeficientes de difusión vertical son de órdenes de magnitud que oscilan entre 10^3 y $10^7 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ y disminuyen con la profundidad. En algunos puntos de medida, de forma puntual y para pequeños incrementos de profundidad, el comportamiento es contrario, debido a problemas de mezcla de aguas de diferente densidad.

Cuando el embalse se encuentra estratificado, los coeficientes de difusión verticales calculados en la epilimnium presentan los valores más altos de toda la lámina de agua, del orden de 10^4 y $10^3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, los valores más altos aparecen en la capa más superficial de la lámina de agua debido a la acción mezcladora del viento. En los puntos más próximos a la descarga de Arrocampo, los valores de los coeficientes calculados en la capa más superficial son mayores que los calculados a la misma profundidad en otros puntos. Ello se debe a que a la acción mezcladora del viento se suma la acción debida a la turbulencia que origina la descarga del embalse de Arrocampo que se realiza en superficie, figura 4.12. En esta capa los coeficientes disminuyen con la profundidad, aumentando la pendiente de la variación al aproximarse a la profundidad en la que se origina la termoclina. A esta profundidad los coeficientes toman valores muy bajos, del mismo orden que los debidos a la difusión molecular, del orden de $10^8 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. En aquellos puntos en que existe doble termoclina, natural y artificial, aparecen dos mínimos del coeficiente de dispersión vertical, correspondientes cada uno de ellos a cada una de las termoclinas. El valor del coeficiente de dispersión de la termoclina artificial es ligeramente superior en los puntos más próximos a la descarga de Arrocampo que en puntos más alejados de dicha descarga.

Figura 4.12.
Perfil vertical de
coeficientes de
difusión turbulenta
vertical en el
embalse Torrejón-
Tajo. Campaña:
25/06/02.



1.4.10. Embalse de Cortes II

Los datos meteorológicos necesarios para el cálculo de las magnitudes aquí relacionadas se han obtenido del Instituto Nacional de Meteorología y de la central nuclear de Cofrentes.

a) Perfiles de densidad y frecuencia de estabilidad

En todas las campañas realizadas y puntos de medida, la densidad del agua aumenta con la profundidad. Si bien, los valores de densidad, la forma de sus perfiles verticales y los gradientes que presenta esta magnitud con la profundidad dependen de la época del ciclo anual en que se han realizado las medidas experimentales y del régimen de funcionamiento de las centrales eléctricas que operan en el embalse. Por ejemplo, en las figuras 4.13 y 4.14, se muestran los perfiles de densidad calculados para las campañas realizadas los días 2 de octubre de 2001 y 6 de abril de 2002, respectivamente.

El día 2 de octubre de 2001, el cuerpo principal del embalse se encontraba en estado estratificado. La presencia de la termoclina se aprecia en el punto más próximo a la presa a una profundidad entre 57 y 60 m y con un gradiente de densidad de $2,56 \text{ kg m}^{-3}$. Aguas arriba, al final del cuerpo principal, el gradiente de densidad es menos acusado $0,41 \text{ kg m}^{-3}$. En la zona intermedia del embalse, comprendida entre el final del cuerpo principal y la antigua presa de Embarcaderos, el espesor de la lámina de agua es inferior a 50 m por lo que esta zona del embalse no se ve afectada por la estratificación. Los perfiles de densidad coinciden con los del epilimnium del cuerpo principal del embalse. Al final de esta zona, los perfiles de densidad cambian sustancialmente. En el punto más próximo a la antigua presa de Embarcaderos y situado aguas abajo de ésta, punto 6 en la figura 4.13, la forma del perfil de densidad, así como los valores calculados, son intermedios entre los ya comentados anteriormente y los calculados para el punto situado aguas arriba de la antigua presa de Embarcaderos, punto 8 en la figura 4.14. En el antiguo embalse de Embarcaderos los perfiles de densidad calculados en los diferentes puntos no presentan grandes diferencias.

En la figura 4.14 se han representado los perfiles de densidad calculados con las medidas experimentales realizadas el día 6 de abril de 2002, en esta época del ciclo térmico anual el embalse de Cortes II se encuentra en régimen de mezcla completa. Los perfiles de densidad en los puntos situados aguas abajo de la antigua presa de Embarcaderos, puntos situados hasta una distancia de 13.350 m de la presa, son prácticamente iguales. En el punto situado inmediatamente aguas arriba de la antigua presa de Embarcaderos, punto 9 en la figura 4.14, el perfil es muy semejante al de los puntos situados aguas abajo de esta presa. En el resto de los puntos de medida situados en el antiguo embalse de Embarcaderos, punto 10 en la figura 4.14, los perfiles son muy semejantes entre sí.

Figura 4.13.
Perfiles verticales de densidad en el embalse de Cortes
II. Campaña: 02/10/01.

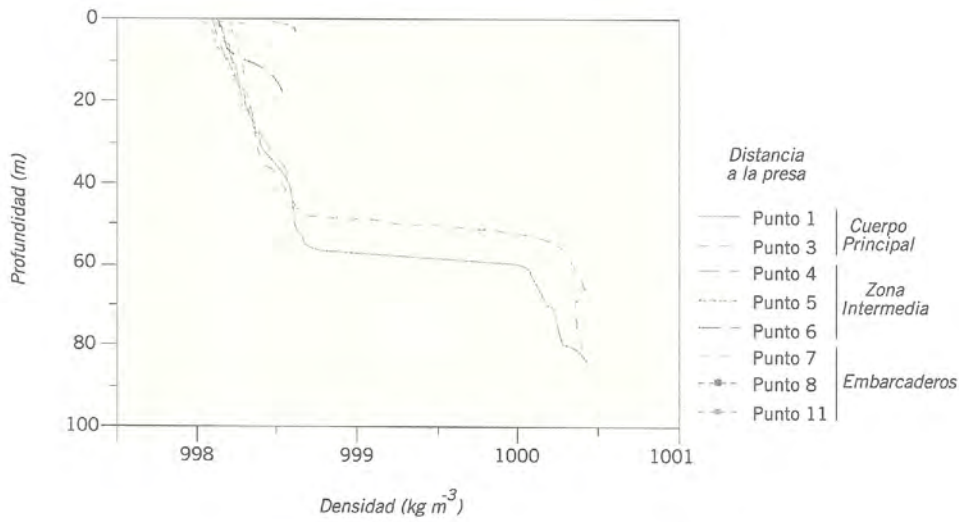
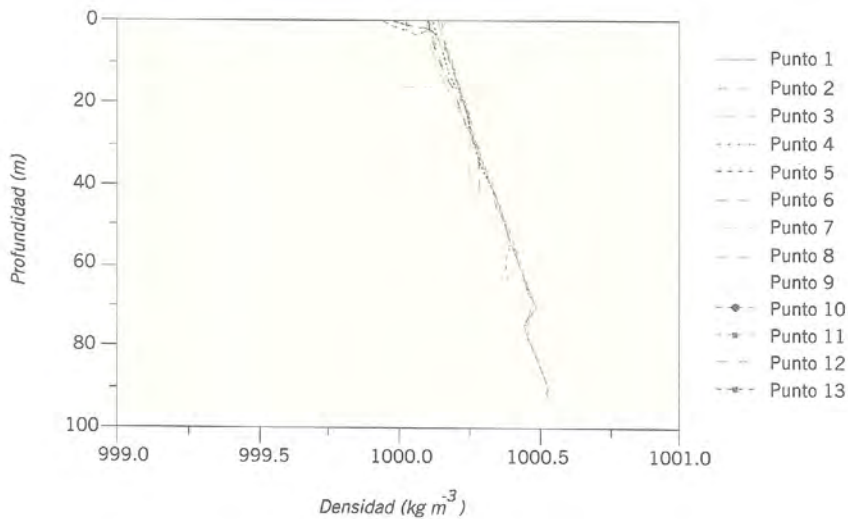


Figura 4.14.
Perfiles verticales de densidad en el embalse de Cortes
II. Campaña: 06/04/02.



La influencia del régimen de funcionamiento de las centrales eléctricas que operan en el embalse se puede comprobar si se comparan los perfiles de densidad mostrado en la figura 4.14, ya comentada, con los de la figura 4.15, llevada a cabo el día 28 de noviembre de 2001. En ambas campañas el embalse se encontraba en régimen de mezcla completa. En el perfil de densidades mostrado en la figura 4.14, las densidades calculadas en los puntos situados aguas arriba de la antigua presa de Embarcaderos son inferiores a las calculadas en los puntos situados aguas abajo de dicha presa. En los perfiles calculados con los resultados de las medidas realizadas el día 28 de noviembre de 2001, la tendencia es la inversa. Las densidades calculadas en los puntos situados aguas arriba de la antigua presa de Embarcaderos son superiores a las calculadas en los puntos situados aguas abajo de dicha presa. Esta diferencia mostrada por ambos perfiles solamente puede ser debida a la operación de alguna de las centrales que operan en el embalse.

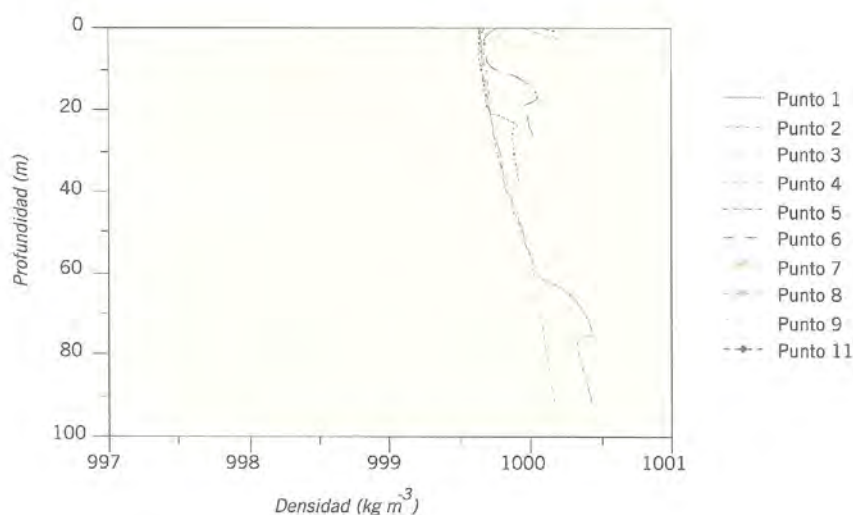


Figura 4.15.
Perfiles verticales
de densidad en el
embalse de Cortes
II. Campaña:
28/11/01.

Los perfiles de frecuencia de estabilidad son coherentes con los de densidad. Los perfiles de frecuencia presentan oscilaciones debidas a la alta sensibilidad de este parámetro a pequeños cambios en la densidad del agua. Las oscilaciones que presentan los perfiles de frecuencia de estabilidad son pequeñas salvo en las zonas del embalse en las que se ha producido desarrollo de estratificación. Por ejemplo, la frecuencia de estabilidad calculado para el punto 1, punto más próximo a la presa, en la campaña realizada el día 2 de octubre de 2001, los perfiles de frecuencia de estabilidad indican la alta inestabilidad de la columna de agua, con valores que oscilan entre $3,381 \times 10^{-4}$ y $2,638 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$, excepto a profundidades próximas 57 m, en que la presencia de la termoclina eleva la frecuencia de estabilidad hasta un valor máximo de $6,082 \times 10^{-2} \text{ s}^{-2}$.

En la época del ciclo térmico anual en que no existe estratificación, los perfiles de frecuencia de estabilidad solamente mantienen las pequeñas oscilaciones comentadas más arriba, con valores que oscilan $8,37 \times 10^{-4}$ y $2,636 \times 10^{-5} \text{ s}^{-2}$.

b) Perfiles del coeficiente de difusión vertical

Los coeficientes de difusión vertical son de órdenes de magnitud que oscilan entre 10^{-3} y $10^{-9} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. En general, y en las épocas del año en que el embalse se encuentra en régimen de mezcla completa o en aquellas zonas del embalse en que no tiene lugar la estratificación, los coeficientes de difusión vertical disminuyen con la profundidad. En algunos puntos de medida, de forma puntual y para pequeños incrementos de profundidad, el comportamiento es contrario, debido a problemas de mezcla de aguas de diferente densidad.

Cuando el embalse se encuentra estratificado, los coeficientes de difusión calculados en la epilimnium presentan los valores más altos de toda la lámina de agua, del orden de $10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. En esta capa los coeficientes disminuyen con la pro-

fundidad, aumentando la pendiente de la variación al aproximarse a la profundidad en la que se origina la termoclina. A esta profundidad los coeficientes toman valores muy bajos, del mismo orden que los debidos a la difusión molecular, entorno a 10^{-8} y 10^{-9} $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$. En la hipolimnium, los coeficientes de difusión disminuyen ligeramente con la profundidad.

Si se comparan los valores de los coeficientes de difusión, calculados a una misma profundidad, de las diferentes partes en que se puede dividir el embalse, cuerpo principal, zona intermedia y antiguo embalse de Embarcaderos, los coeficientes calculados en cualquier punto del cuerpo principal son mayores que los calculados para puntos situados en las otras dos zonas. Los coeficientes más bajos se han calculado para la masa de agua contenida en el antiguo embalse de Embarcaderos.

2. MODELIZACIÓN DE SISTEMAS HIDROLÓGICOS

La finalidad última del conjunto de las campañas experimentales realizadas, y del análisis de los resultados proporcionados por las mismas, ha sido alcanzar un conocimiento suficiente del sistema hidrológico estudiado, de modo que fuera posible anticipar su comportamiento ante un vertido contaminante de naturaleza química o radioactiva. Este conocimiento se ha plasmado en un conjunto de modelos dinámicos, algunos de los cuales han sido recogidos de la bibliografía. En otros casos, especialmente en aquellos en los que se ha considerado que éstos no proporcionaban una descripción adecuada del medio hídrico, han sido desarrollados específicamente en este proyecto.

La calidad de las predicciones realizadas con los modelos propuestos ha podido ser evaluada cuantitativamente en el caso del tramo del río, debido a que se disponía de experimentos de trazador con los que comparar los resultados ofrecidos por los diferentes modelos. Este tipo de experimentación no ha podido realizarse en los embalses, lo que ha impedido efectuar una calibración de los modelos similar a la que se ha realizado en el caso del río.

En este apartado se describen en primer lugar los aspectos generales de la modelización de los tramos de ríos y embalses. Posteriormente se desarrollan los aspectos específicos para cada uno de los tramos de sistemas hidrológicos que pueden verse afectados por vertidos de las centrales nucleares objeto de estudio.

2.1. Aspectos generales de la modelización

2.1.1. Modelización de ríos

Para la modelización físico-matemática de la dispersión pueden utilizarse diferentes tipos de modelos. Todos los modelos incluyen, en mayor o menor medi-

da, idealizaciones y/o simplificaciones, que dependiendo de las características de la corriente tratada, pueden ser más o menos realísticas y conducir a predicciones más o menos ajustadas a los resultados experimentales.

Por otra parte, en la elaboración de resultados se han empleado diferentes métodos de cálculo del coeficiente de dispersión basados en diferentes conceptos que dan lugar, en algunos casos, a valores de los coeficientes de dispersión muy diferentes. Un buen modelo de dispersión sin un valor adecuado del coeficiente de dispersión no puede realizar una predicción realista de la dispersión del vertido en el medio hídrico.

Por lo tanto, la modelización de los tramos de río exige:

- Selección de un modelo matemático que prediga de forma adecuada las distribuciones de concentración de trazador.
- Selección del método de cálculo del coeficiente de dispersión que conduce a los valores de este parámetro más realísticos.

Para la modelización físico-matemática de la dispersión pueden utilizarse diferentes tipos de modelos, que se clasifican en tres categorías diferentes, I.A.E.A., 1985.

- Modelos Analíticos, basados en la resolución exacta de las ecuaciones que describen el proceso de dispersión y transporte.
- Modelos Numéricos, basados en las mismas ecuaciones básicas, resueltas mediante técnicas de diferencias o elementos finitos.
- Modelos Tipo Caja, que tratan la masa de agua completa o secciones de la misma como compartimentos homogéneos. En estos modelos se calculan concentraciones medias en cada una de las secciones y las constantes de transferencia se establecen de forma que puedan relacionarse variables de compartimentos vecinos.

Todos los modelos incluyen, en mayor o menor medida, simplificaciones en la geometría del sistema, en los coeficientes de dispersión, en las condiciones fluidodinámicas, etc., por lo que para poder utilizar uno concreto habrá que comprobar que los errores entre resultados experimentales y predichos, provocados por estas simplificaciones, estén dentro del margen permitido.

Los modelos físico-matemáticos de dispersión tienen su punto de partida en la ecuación de conservación de materia en un elemento infinitesimal de la corriente pero dada la dificultad de resolver esta ecuación es frecuente recurrir a simplificaciones para su tratamiento analítico o numérico.

a) El Análisis de Taylor

El aspecto inicial que adquiere una cierta cantidad de materia inyectada en una

corriente de agua está dictado fundamentalmente por los perfiles de velocidad en la sección transversal de la corriente. Los estudios teóricos y experimentales realizados por Taylor, 1953, 1954, sobre el flujo en tuberías indican que a cierta distancia, aguas abajo del punto de inyección, se alcanza un equilibrio entre los gradientes transversales de velocidad, que impulsan la dispersión longitudinal, y la difusión transversal, que trata de retrasarla. Más allá de este punto se producen dos efectos.

- La varianza espacial de la nube de trazador aumenta linealmente con el tiempo, de acuerdo con las predicciones de la ley de Fick.
- El sesgo, causado por los gradientes de velocidad en la mancha de trazador a su paso por la zona de advección (campo próximo + campo intermedio), empieza a disminuir de forma progresiva y, finalmente, adquiere un aspecto gaussiano. A la zona en la que la varianza espacial aumenta linealmente se la conoce como zona de equilibrio (campo lejano).

Estos resultados experimentales llevaron a Taylor a pensar que la concentración promedio en la sección transversal podía ser modelizada adecuadamente mediante la aplicación de la ley de Fick y que los efectos de los gradientes de velocidad y de la mezcla turbulenta, tanto vertical como transversal, podían incluirse en un coeficiente de dispersión longitudinal, D_L .

El balance de materia para compuestos no conservativos, que experimenten reacciones químicas o descomposiciones radioactivas en paralelo con los procesos dispersantes y diluyentes asociados al transporte, para el caso de una cinética de primer orden, responde a la siguiente expresión:

$$\frac{\partial C_m}{\partial t} + u_m \frac{\partial C_m}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 C_m}{\partial x^2} - \lambda C_m \quad [4.57]$$

Donde C_m y u_m son la concentración y velocidad medias en la sección transversal, t es el tiempo, x es la distancia desde el punto de inyección, λ es la constante cinética y D_L es el coeficiente de dispersión.

La distribución de concentración de trazador en función de la distancia y el tiempo para una inyección instantánea a $t = 0$ en una tubería cilíndrica en la que u_m y D_L sean constantes, viene dada por la siguiente ecuación:

$$C_m(x,t) = \frac{M_0}{A\sqrt{4\pi D_L t}} \exp\left(-\frac{(x-u_m t)^2}{4D_L t} - \lambda t\right) \quad [4.58]$$

b) Modelo de celdas en serie

El denominado modelo de celdas en serie es un modelo de amplia difusión en el campo de la ingeniería química, el modelo de tanques de mezcla completa

en serie, que describe un tramo de río como un conjunto de compartimentos del mismo tamaño. Cada uno de estos compartimentos está perfectamente agitado, de modo que la concentración a la salida de cada uno de ellos es idéntica a la que existe en su interior. La concentración de un compuesto conservativo inyectado en la serie de celdas depende solamente de su concentración en el flujo de entrada y del tiempo de residencia de cada celda, Levenspiel, 1958,. El único parámetro del modelo es el número de celdas.

El balance de materia para un compuesto no conservativo, que experimente una reacción cinética de primer orden o decaimiento radiactivo, viene dado por la siguiente ecuación:

$$V_i \frac{\partial C_i}{\partial t} = QC_{i-1} - (Q + \lambda V_i)C_i \quad [4.59]$$

donde C_i y C_{i-1} son, respectivamente, la concentración del compuesto en las celdas i e $i-1$, V_i es el volumen de la celda, Q es el caudal del río y λ es la constante reacción o decaimiento.

Si se produce una inyección instantánea de una cierta cantidad de materia M_0 en una celda cualquiera a tiempo $t = 0$, la concentración del compuesto en su interior varía con el tiempo de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$C_i(t) = \frac{M_0}{V_i} \exp(-\alpha_r t) \quad [4.60]$$

donde α_r viene dada por la siguiente expresión:

$$\alpha_r = \lambda + \frac{1}{t_i} \quad [4.61]$$

En la que t_i es el tiempo de residencia en una celda, dado por la relación entre su volumen y el caudal circulante.

Para una serie de N_c celdas idénticas, la concentración a la salida de la última celda viene dada por la siguiente expresión:

$$C_{N_c}(t) = \frac{\alpha_r^n t^n}{(N_c - 1)!} \frac{M_0}{V_i} \exp(-\alpha_r t) \quad [4.62]$$

El balance de la ecuación 4.59 y el conjunto de expresiones obtenidas son válidos igualmente para compuestos conservativos sin más que hacer λ igual a cero.

El modelo de celdas en serie presenta numerosas ventajas, entre ellas su simplicidad conceptual, pero también presenta ciertos inconvenientes tales como los que se describen a continuación:

- No es capaz de reproducir el sesgo que habitualmente se observa en las distribuciones experimentales de trazador tomadas en experimentos realizados en ríos, *Stefan y Demetracopoulos, 1981*.
- El número de celdas determina al mismo tiempo el tiempo de viaje, la intensidad de la dispersión y el sesgo de las distribuciones. Estos parámetros no pueden ser variados de forma individual, por lo que se restringe a utilidad del modelo.

c) El Análisis de Chatwin. Modelos Estadísticos no Gaussianos

La aplicación del análisis de Taylor, 1954, está restringida al cumplimiento de una serie de condiciones. Sin embargo, en numerosas ocasiones, una o más de estas restricciones no se cumplen y la descripción que esta teoría hace del fenómeno de la dispersión no se ajusta de forma completamente satisfactoria a los datos obtenidos experimentalmente.

P.C. Chatwin, 1980, examinó los datos de laboratorio de Fischer y demostró que, aunque las ecuaciones [4.6] y [4.7] pueden describir satisfactoriamente el comportamiento del centroide y la varianza de las curvas de paso originadas por un vertido en un curso de agua, sus predicciones indican que estas distribuciones adquieren aspecto gaussiano más rápido de lo que en realidad lo hacen, por lo que no resulta adecuada para justificar la evolución observada experimentalmente en el sesgo de estas curvas. Esta evidencia experimental ha sido señalada por numerosos autores, *Denton, 1990; Liu y Cheng, 1980; Sayre y Chang, 1968*, que han sugerido que la distancia necesaria para que la mancha de trazador adquiera morfología gaussiana es relativamente larga. La razón más probable para explicar este comportamiento es la presencia de una subcapa viscosa cerca de la pared del canal, de modo que la materia que difunde hacia esta subcapa queda temporalmente retenida cerca del fondo y las paredes del cauce. Una vez que la nube principal ha pasado, el compuesto vertido vuelve a difundir a la corriente principal y ocasiona las largas colas, que pueden apreciarse en los perfiles experimentales.

Estos estudios permitieron a Chatwin, 1980, proponer una descripción de tipo no gaussiano basada en la forma de Edgeworth de las series de tipo A de Charlier. Estas series han sido aplicadas con éxito para la descripción de perfiles no gaussianos de concentraciones de contaminantes inertes en tuberías y canales de sección transversal constante. Las series de Edgeworth tienen la ventaja de su flexibilidad, ya que pueden ser aplicadas a curvas concentración-tiempo o concentración-distancia.

La distribución que calcula este modelo se fundamenta en el tiempo medio y los cuatro primeros momentos centrales de la curva de paso medida experimen-

talmente. El perfil propuesto como ajuste a las curvas experimentales responde a la siguiente expresión:

$$C_m(x,t) = \frac{\mu_0}{(2\pi\mu_2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{\tau^2}{2}\right) \left[1 + \frac{\lambda_3}{6} H_3(\tau) + \frac{\lambda_4}{24} H_4(\tau) + \frac{\lambda_5^2}{72} H_6(\tau) \right] \quad [4.63]$$

Donde τ es una variable normalizada de tiempo, definida por la siguiente ecuación:

$$\tau = \mu_2^{-1/2} (t - \mu_1) \quad [4.64]$$

Los términos H_3 , H_4 y H_6 son los polinomios de Hermite, definidos por las siguientes expresiones:

$$H_3(\tau) = \tau^3 - 3\tau \quad [4.65]$$

$$H_4(\tau) = \tau^4 - 6\tau^2 + 3 \quad [4.66]$$

$$H_6(\tau) = \tau^6 - 15\tau^4 + 45\tau^2 - 15 \quad [4.67]$$

El método de Chatwin presenta la ventaja de considerar los tres primeros momentos centrales de la distribución obtenida experimentalmente y no sólo la media y varianza, usados en la teoría de Taylor. El análisis de Chatwin provee, además, de una aproximación para describir la curva concentración-tiempo a distancias inferiores a la longitud de mezcla. Esta aproximación responde a la siguiente expresión:

$$C_m(x,t) = \frac{M_0}{A\sqrt{4\pi D_L t}} \exp\left(-\frac{(x - u_m t)^2}{4 D_L t}\right) \left[1 + \beta_c \left(\frac{4 D_L}{u_m^2 t}\right)^{1/2} H_3 \frac{x - u_m t}{\sqrt{2 D_L t}} \right] \quad [4.68]$$

Donde β_c es un parámetro adimensional que depende de la forma de la sección transversal de flujo y del perfil de velocidades en la misma y para el que el autor propone un valor aproximado medio de 0,8.

2.1.2. Modelización de embalses

Tradicionalmente, la mayoría de los modelos de embalses recogidos en la bibliografía están enfocados al estudio y predicción del comportamiento térmico, mientras que el transporte y la dispersión de los posibles vertidos a estos medios se ha abordado con modelos más o menos simplificados, tales como:

- Modelo de Tanque de Mezcla Completa.
- Modelo en Flujo de Pistón.

- Modelo de Mezcla Parcial con Recirculación.
- Modelos Simples de Embalses Estratificados.

El uso de modelos simplificados para la predicción de la dinámica dispersante de los embalses englobados en este proyecto hubiera supuesto una infrautilización significativa del conocimiento adquirido en las numerosas campañas experimentales realizadas. Este hecho ha llevado al diseño e implementación de modelos específicos para los cuatro embalses, basados en las caracterizaciones obtenidas tanto en las campañas verticales como en las horizontales. Estas caracterizaciones se han materializado en los siguientes aspectos propios de la dinámica de embalses:

- Duración e intensidad de los ciclos de estratificación térmica.
- Determinación de la significación del aporte de calor de las centrales nucleares a la dinámica del embalse que utilizan como foco frío.
- Localización de la picnoclina (termoclina y/o quimioclina) a lo largo del ciclo anual.
- Verificación de las condiciones de difusión vertical a través de la barrera de estabilidad de la picnoclina.
- Definición y ubicación de la epilimnion e hipolimnion en estado estratificado.
- Establecimiento del volumen de embalse afectado por posibles vertidos contaminantes.

Las características hidráulicas generales de estos embalses se hallan descritas en el apartado 2 de esta memoria, recogiéndose aquí únicamente aquellos aspectos que son necesarios para el diseño y operación de los modelos propuestos para cada uno de ellos.

Independientemente del modelo seleccionado para representar el embalse o zona de embalse considerado, las ecuaciones del modelo se establecen mediante balances de materia considerando que el embalse o zona se encuentra constituido por un número de celdas de mezcla completa conectados en serie. Esta hipótesis implica la segmentación del medio hídrico en un número de elementos, N . A cada elemento se le aplica el siguiente procedimiento:

- Cálculo de área superficial de cada sección y del porcentaje que ésta representa respecto al área superficial total de su zona. Todas estas áreas han de calcularse para el nivel de llenado real del embalse.
- Cálculo de la anchura superficial en ambos extremos de cada una de las secciones.
- Cálculo del espesor de la capa superficial al inicio y final de cada sección.
- Cálculo del área superficial del embalse a la profundidad de la capa homogénea al inicio y final de cada sección.

- Cálculo del volumen de la capa superficial y del conjunto hipolimnion + epilimnion de cada una de las secciones, en el caso de que el embalse o zona se encuentre sometido a estratificación natural o artificial.
- Cálculo de la anchura del cauce a la profundidad de la capa superficial y de la cota de fondo al inicio y final de cada sección.
- Estimación del área transversal media de flujo al inicio y final de cada sección, tanto en estado estratificado como homogéneo, y de las velocidades medias correspondientes a cada una de las secciones.
- Cálculo/estimación del coeficiente de difusión-dispersión longitudinal. A medida que las aguas del río se internan en el embalse se produce un cambio en las condiciones dinámicas, que se traduce en una competencia efectiva entre los procesos de dispersión y difusión, de modo que el primero es más importante en la cola del embalse y el segundo predomina en el cuerpo principal. El resto del medio hídrico registra condiciones intermedias entre ambos casos. La determinación exacta del coeficiente de dispersión exige el uso de trazador. Sin embargo, la gran cantidad de agua contenida en un embalse resulta inviable desde los puntos de vista técnico y medioambiental. Este hecho se comprobó en el desarrollo del proyecto Tracer I, en el que se realizó una inyección de trazador en la cola del embalse de Entrepeñas. En esta campaña solamente se pudo determinar el coeficiente de difusión-dispersión longitudinal para el inicio de la zona alta del embalse, obteniéndose un valor medio de $1 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, considerando el tramo de río, y $0,743 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, si sólo se tiene en cuenta el proceso de dispersión dentro del embalse. El valor del coeficiente utilizado en la modelización del resto de embalses o zonas de embalse se ha obtenido por una comparación de las características dinámicas de estas secciones con aquella en la que se realizó el experimento con trazadores. Los coeficientes de dispersión estimados de esta forma muestran buena concordancia con el valor obtenido por Csanady, 1963, para diferentes embalses.
- Cálculo del número de elementos del modelo, mediante la expresión propuesta por Levenspiel:

$$N = \frac{u_m^2 t_m}{2D_L} \quad [4.69]$$

- El volumen individual de cada elemento resulta de la relación entre el volumen total de cada zona y el número de éstos. Estos volúmenes son diferentes en el periodo homogéneo y en periodo estratificado, si el embalse sufre estratificación natural o artificial.
- Estimación del incremento de tiempo de cálculo idóneo que permita compatibilizar el tiempo de proceso y la exactitud de la respuesta del sistema.

2.2. Aspectos particulares de la modelización

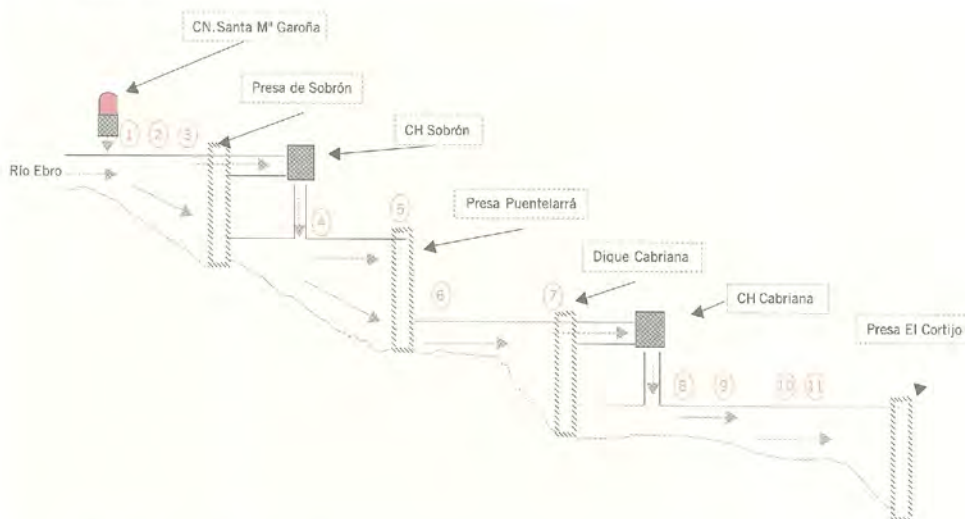
Los aspectos particulares de la modelización de los sistemas hidrológicos se va a realizar por separado para cada uno de los tramos que puede verse afectado por el vertido de las centrales nucleares objeto de estudio.

2.2.1. Central nuclear Santa María de Garoña

De los resultados de la caracterización hidráulica e hidrológica y experimental de las campañas de campo se puede concluir que el tramo del río Ebro que puede verse afectado por un vertido de la central nuclear Santa María de Garoña se puede esquematizar como se muestra en la figura 4.16. La presencia de presas y diques hace que el tramo sea un tramo mixto con embalses y tramos de río. El estudio realizado permite establecer los siguientes tramos:

- Embalse de Sobrón.
- Presa de Sobrón-presa de Puentelarrá.
- Presa de Puentelarra-dique de Cabriana.
- Ebro medio.

Figura 4.16. Esquema del tramo que puede verse afectado por vertidos de la central nuclear Santa María de Garoña.



a) Embalse de Sobrón

La modelización del embalse se ha realizado con base en la caracterización hidráulica que se ha llevado a cabo en la tarea de Documentación y del análisis de la estructura de su lámina de agua realizada en la elaboración de resultados.

Las principales conclusiones que se pueden establecer sobre el comportamiento del embalse de Sobrón son las siguientes:

- El aporte más importante del embalse es el río Ebro. El resto de los aportes son arroyos que solamente presentan caudales considerables en épocas de

- fuertes lluvias. El caudal medio de entrada al embalse es de $23,29 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El volumen medio de agua embalsada es de $18,483 \text{ hm}^3$. Presenta variaciones con valores máximos y mínimos de $19,868$ y $15,664 \text{ hm}^3$, respectivamente. La máxima diferencia en el volumen de agua embalsada es de $4,204 \text{ hm}^3$.
- La cota media de la superficie del agua medida sobre el nivel del mar es 511 m.s.n.m. La cota de fondo es 480 m.s.n.m.
 - El tiempo medio de residencia, calculado sobre la base del volumen medio de agua embalsada y caudal medio a la entrada del embalse, es de $9,18 \text{ d.}$ Este tiempo medio de residencia es pequeño para esperar estratificación natural en el embalse.
 - De los resultados de las medidas experimentales se pueden extraer las siguientes conclusiones sobre la dinámica del embalse de Sobrón:
 - El agua vertida por la central nuclear se encuentra a mayor temperatura que el agua que contiene el embalse. La conductividad eléctrica del agua vertida por la central nuclear es prácticamente igual que la del agua contenida en el embalse. Por lo tanto el vertido de la central nuclear flota sobre el agua que contiene el embalse.
 - El vertido se extiende aguas arriba y aguas abajo del avenamiento del canal de descarga de la central nuclear. La zona afectada aguas arriba depende del caudal de entrada al embalse a través del río Ebro y del caudal vertido por la central nuclear. En forma conservativa, se considera que la zona afectada llega hasta una distancia de la presa del embalse del Sobrón de 15.700 m. Aguas abajo del avenamiento del canal de descarga de la central nuclear, la zona afectada por el vertido se extiende hasta la presa del embalse.
 - El embalse sufre estratificación natural en su cuerpo principal, zona más profunda del embalse (desde distancias de la presa 5.600 m, distancia a la que se encuentra situado el puente que comunica la carretera comarcal con la población de Tobalinilla). Según se ha comentado en párrafos anteriores, el tiempo medio de residencia del agua en el embalse es pequeño para esperar estratificación natural, sin embargo, las medidas experimentales indican que el cuerpo principal del embalse se encuentra sometido a estratificación natural durante parte del ciclo anual. Esta aparente discrepancia de resultados se puede explicar sobre la base de la operación de descarga del embalse. La descarga habitual del embalse es por el canal de la central hidroeléctrica de Sobrón, solamente durante unos pocos días al año se realiza vertido por compuerta o aliviadero de fondo. El canal se encuentra abierto en superficie con una profundidad de 10 m, como la profundidad en esta zona del embalse es alrededor de 30 m no existe renovación del agua de profundidad y el tiempo de residencia de esta zona de acumulación

es superior al tiempo medio de residencia calculado a partir de datos medios de volumen de agua embalsada y caudal de entrada de agua al embalse. En el resto del embalse no existe estratificación natural.

- Además de la estratificación natural, el embalse experimenta estratificación térmica artificial debido al vertido de la central nuclear. La estratificación permanece todo el año y se extiende a toda la zona de influencia de la central nuclear (15.700 m desde la presa del embalse). En la época del año en que se encuentra totalmente desarrollada la estratificación natural, su termoclina se sitúa a una profundidad de 15,5 m. La profundidad de la termoclina de la estratificación artificial se sitúa a una profundidad que varía entre 8 y 3,5 m. Por la evolución de la temperatura con la distancia a la presa se deduce que el vertido de la central nuclear viaja por la lámina superior de agua durante el periodo de estratificación. Por lo tanto, la estratificación natural no afecta al volumen útil del embalse para la dilución y dispersión de un hipotético vertido. Estando marcado este parámetro por la profundidad de la termoclina artificial.
- Dentro de la zona de influencia, aguas arriba de la descarga de la central nuclear, no se han observado tomas de agua en el río Ebro. En la margen izquierda del río y a la altura de la población de Bárcina del Barco, se encuentran en explotación algunos huertos familiares que podrían suministrarse de agua del río para fines de regadío. No obstante, esta zona se encuentra al final de la zona de influencia de la central nuclear y la concentración de actividad debería ser muy pequeña.
- Aguas abajo del avenamiento del canal de descarga de la central nuclear, no se han observado tomas de agua en el embalse. A 5.600 m de la presa del embalse y en la margen derecha del embalse se encuentra ubicada la población de Tobalinilla, con construcciones muy próximas a la orilla del embalse.

Con base en la caracterización hidráulica realizada y en las conclusiones obtenidas de las campañas experimentales, se establecen las conclusiones siguientes:

- El embalse se puede considerar dividido en tres secciones.
 - Zona alta del embalse. Constituida por la zona del embalse situada aguas arriba del avenamiento del canal de descarga de la central nuclear y que está bajo la influencia de vertidos de la central nuclear.
 - Zona medía del embalse. Desde el avenamiento de la central nuclear hasta el puente de Tobalinilla. Esta sección se encuentra a 2.350 m de la presa del embalse.
 - Zona baja del embalse. Desde donde termina la anterior hasta la presa del embalse.

- En la modelización del embalse se utilizan dos modelos. La zona alta del embalse se modeliza mediante el modelo de Compartimentos Segmentados con Recirculación. En la figura 4.17 se esquematizan las condiciones de flujo que se consideran en este modelo. La corriente descargada por la central nuclear, con caudal Q_D , se bifurca en dos. Una con caudal Q_R circula aguas arriba del avenamiento del canal de descarga. La segunda con caudal Q_S circula en la misma dirección que el agua que aporta el río Ebro al embalse con caudal Q_B . El balance de materia a cada uno de los elementos del sistema está dado por las ecuaciones [4.70] a [4.72].

– Balance en el elemento de descarga (n):

$$Q_D C_D + Q_{n-1} C_{n-1} = Q_R C_R + Q_S C_S + \frac{d}{dt} (V_n C_n) + V_n \lambda C_n \quad [4.70]$$

– Balance en un elemento intermedio ($n-1$):

$$Q_{n-2} C_{n-2} + Q_R C_R = Q_{R-1} C_{R-1} + Q_{n-1} C_{n-1} + \frac{d}{dt} (V_{n-1} C_{n-1}) + V_{n-1} \lambda C_{n-1} \quad [4.71]$$

– Balance en el elemento inicial (1):

$$Q_{B0} C_{B0} + Q_2 C_2 = Q_1 C_1 + \frac{d}{dt} (V_1 C_1) + V_1 \lambda C_1 \quad [4.72]$$

Donde V_i es el volumen de cada elemento, λ es la constante cinética del proceso y Q_D y C_D son el caudal y la concentración del contaminante descargado.

Las zonas media y baja del embalse se modelizan mediante el modelo de Compartimentos Segmentados. El modelo de Compartimentos Segmentados considera al medio hídrico segmentado en la dirección longitudinal. El agua que proviene de la central nuclear circula por la capa de agua superficial sin mezclarse con la de la capa más profunda, por la que circula agua que proviene del aporte del río Ebro. La capa superficial se modeliza como una serie de tanques de mezcla completa conectados en serie, figura 4.18. El balance de materia a cada uno de los elementos del sistema está dado por la ecuación 4.73.

$$Q_e C_{n-1} = Q_s C_n + \frac{d}{dt} (V_n C_n) + V_n \lambda C_n \quad [4.73]$$

Donde V_i es el volumen de cada elemento de la capa superior de agua, λ es la constante cinética del proceso

- En el embalse se consideran tres puntos de interés, figura 4.16.
 - Punto 1. Avenamiento del canal de descarga de la central nuclear.
 - Punto 2. A 5.600 m de la presa del embalse. Este punto se encuentra situado a la altura de la población de Tobalinilla.
 - Punto 3. Presa del embalse.

Figura 4.17.
Diagrama de flujo del modelo de compartimentos segmentados con recirculación.

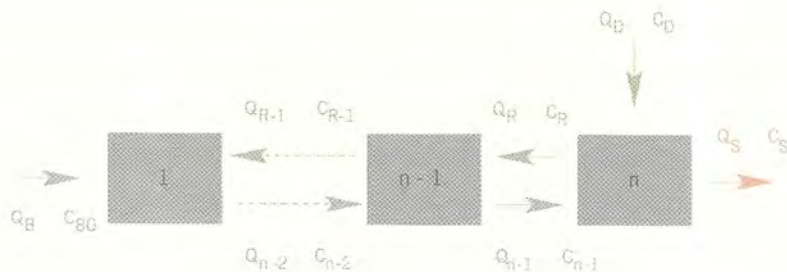
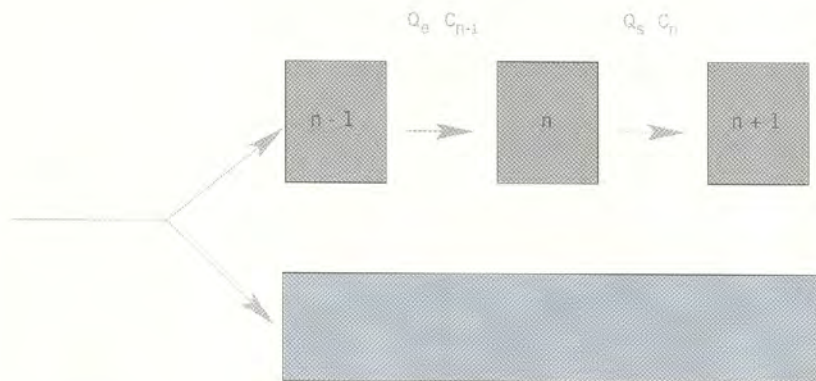


Figura 4.18.
Diagrama de flujo del modelo de compartimentos segmentados.



b) Presa de Sobrón-presas de Puentelearrá

La modelización de este tramo se ha realizado con base en la caracterización hidráulica que se ha llevado a cabo en la tarea de Documentación en los proyectos TRACER I y II y del análisis de la estructura de la lámina de agua del embalse de Puentelearrá realizada dentro del proyecto Tracer I.

Las principales conclusiones que se pueden establecer a partir de la documentación realizada en el marco de ambos proyectos Tracer es la siguiente:

- La presa del Sobrón no deja caudal ecológico continuo, pero en verano vierte $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ por aliviadero durante 20 minutos al día. Durante el resto del año, la presa vierte en época de lluvias cuando las aportaciones superan $80 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; este tipo de vertidos se realiza una media de 80 días al año. Por tanto, en condiciones normales, el cauce del río queda cubierto por una fina película de agua resultado de los aportes de pequeñas fuentes y surgencias y el agua embalsada por la presa del Sobrón se descarga mediante un túnel hasta las turbinas de la central hidroeléctrica del mismo nombre.
- El canal que alimenta la central hidroeléctrica del Sobron, en su inicio es rectangular con un vano de 10 m, posteriormente se estrecha a un diámetro

de 5 m. La longitud del canal es de 5,450 m. Las características geométricas del canal y las características de flujo que en él se desarrollan hacen que la dispersión que tiene lugar en su recorrido sea muy baja.

- El caudal máximo turbinado por la central hidroeléctrica de Sobrón es de $80 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El caudal, prácticamente, coincide con los aportes de Sobrón, los caudales fuera de la época de riegos raramente bajan de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en los meses no lluviosos. En la época de riegos, el caudal se encuentra habitualmente entre 20 y $50 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El caudal medio de salida es de $21,91 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.
- La salida de turbinas de la central hidroeléctrica de Sobrón avana en la cola del embalse de Puentelarrá. El embalse de Puentelarrá actúa como contra embalse de él de Sobrón y el aporte coincide con las aportaciones de Sobrón, salvo en regimen de avenidas en que el arroyo del Omecillo aporta un caudal apreciable.
- La capacidad del embalse de Puentelarrá es de 1 hm^3 , la anchura máxima es de 100 m y la profundidad máxima es de 8 m . La aportación media anual es de unos 1.550 hm^3 (sin contar las del Omecillo, que desemboca a un km de la presa) lo que significa que la tasa de renovación es muy elevada (casi dos veces al día con caudales mínimos y del orden de 4 veces al día por término medio). La cota del embalse fluctúa hasta 2 m .
- De los resultados de las medidas experimentales y de la caracterización de la lámina de agua, realizadas dentro del proyecto Tracer I, se puede concluir que el embalse de Puentelarrá presenta homogeneidad vertical en cualquier época del ciclo anual.

Con base en la caracterización hidráulica realizada y en las conclusiones obtenidas de las campañas experimentales, se establecen las conclusiones siguientes:

El tramo se puede considerar dividido en dos secciones:

- Canal de la central hidroeléctrica de Sobrón. Comprende desde la presa de Sobrón hasta la descarga de turbinas de la central hidroeléctrica del mismo nombre.
- Embalse de Puentelarrá. Abarca desde el final de la sección anterior hasta la presa del embalse
- En la modelización del embalse se utilizan dos modelos. Debido a la baja capacidad de dispersión y dilución que presenta el canal de la central hidroeléctrica de Sobrón, esta sección se ha considerado como un elemento tubular que solamente introduce un retraso en la entrada de la mancha de vertido al embalse de Puentelarrá. El retraso introducido viene dado por el tiempo de residencia del agua en el canal, V/Q . El embalse de Puentelarrá se ha modelizado con el modelo de Tanques en Serie, que se esquematiza en la figu-

ra 4.19. El balance de materia para cada uno de los tanques del modelo está dado por la ecuación 4.73.

- En el embalse se consideran dos puntos de interés, figura 4.16.
 - Salida de turbinas de la central hidroeléctrica de Sobrón, punto 4 en figura 4.16.
 - Presa de Puentelarrá, punto 5 en figura 4.16.

Figura 4.19.
Diagrama de flujo
del modelo de
tanques en serie.



c) Presa de Puentelarrá-dique de Cabriana

Se trata de un tramo de río en régimen regulado en el que al final del tramo el flujo se encuentra interrumpido por el dique de Cabriana. Del embalsamiento provocado por dicho dique, se detrae agua mediante un canal que alimenta las turbinas de la central hidroeléctrica de Cabriana.

De la discriminación de modelos se han obtenido las siguientes conclusiones generales para las dos estaciones de muestreo.

- Los tiempos medios y de máximo de las distribuciones calculadas con los coeficientes calculados con los diferentes métodos son prácticamente iguales.
- El modelo de Chatwin es el que mejor ajusta los coeficientes de curtosis y de sesgo y la razón de asimetría de las distribuciones calculadas y experimental de las dos estaciones de muestreo.
- Con base en las anteriores conclusiones, en la discriminación se utilizarán los siguientes estadísticos: Concentración máxima, anchura de la curva al 50% de la concentración máxima y varianza.

En la primera estación el modelo de Chatwin antes de alcanzar la longitud de mezcla, ecuación [4.68], es el que mejor ajusta la concentración máxima y la desviación típica. Este hecho corrobora el hecho comentado en el apartado de Campañas de Campo, de que durante la realización de las medidas experimentales, en esta estación se percibió visualmente que no se había alcanzado la longitud de mezcla.

En la segunda estación los resultados obtenidos por los tres modelos son muy semejantes. Si bien, si se considera que el modelo de Chatwin es el único que ajusta los valores de los coeficientes de curtosis y de sesgo y la razón de asimetría de las distribuciones calculadas y experimental, este modelo sería el recomendado.

d) Ebro Medio

Se trata de un tramo de río en régimen regulado en el que al final del tramo el flujo se encuentra interrumpido por la presa del embalse del Cortijo.

De la discriminación de modelos se han obtenido las siguientes conclusiones generales para las cuatro estaciones de muestreo.

- Los tiempos medios y de máximo de las distribuciones calculadas con los coeficientes calculados con los diferentes métodos son prácticamente iguales.
- El modelo de Chatwin es el que mejor ajusta los coeficientes de curtosis y de sesgo y la razón de asimetría de las distribuciones calculadas y experimentales de las cuatro estaciones de muestreo.
- Con base en las anteriores conclusiones, en la discriminación se utilizarán los siguientes estadísticos: Concentración máxima, anchura de la curva al 50% de la concentración máxima y varianza.

En la primera estación los resultados de la discriminación de modelos no se encuentran bien definidos. Los mejores resultados respecto a la concentración máxima los arroja el método de Chatwin antes de la longitud de mezcla, sin embargo, la anchura de curva al 50% de la concentración máxima el mejor ajuste lo proporciona el método de Chatwin y para la varianza el mejor método es el de Taylor.

En el resto de las estaciones de muestreo el modelo que mejor ajusta los resultados es el modelo de Chatwin.

2.2.2. Central nuclear de Ascó

Se trata de un tramo de río en régimen regulado. La única interrupción del flujo que existe es el azud de Cherta.

De la discriminación de modelos se han obtenido las siguientes conclusiones generales para todas las estaciones de muestreo.

- Los tiempos medios y de máximo de las distribuciones predichas con los coeficientes calculados con los diferentes métodos son prácticamente iguales.
- El modelo de Chatwin es el que mejor ajusta los coeficientes de curtosis y de sesgo y la razón de asimetría de las distribuciones predichas y de experimental de todas las estaciones de muestreo.
- Con base en las anteriores conclusiones, en la discriminación se utilizarán los siguientes estadísticos: concentración máxima, anchura de la curva al 50% de la concentración máxima y varianza.

En el cálculo de la concentración máxima, salvo en la cuarta estación, Cherta, en que el método de Chatwin da muy malos resultados, la eficacia para la modelización es equivalente para todos los modelos.

En la predicción de la anchura de curva al 50% la concentración máxima y de la varianza los peores resultados los presentan los modelos de Tanques en serie y Gaussiano, sobre todo en las primeras estaciones. Mientras que si se considera el conjunto de estaciones, el modelo de Chatwin es el que mejores resultados ofrece.

2.2.3. Central nuclear de Trillo

De los resultados de la caracterización hidráulica e hidrológica y experimental de las campañas de campo realizadas se puede concluir que el tramo del río Tajo que puede verse afectado por un vertido de la central nuclear de Trillo se pueden diferenciar tres tramos.

- Tajo alto.
- Embalse de Entrepeñas.
- Embalse de Bolarque.

a) Tajo alto

De la discriminación de modelos se han obtenido las siguiente conclusiones generales para todas las estaciones de muestreo y campañas realizadas:

- La concentración máxima obtenida de las distribuciones experimentales se aproxima más a la calculada por cualquiera de los modelos cuanto mayor es la distancia entre el punto de inyección y la estación de muestreo. El modelo que mejores resultados ha proporcionado ha sido el propuesto por Chatwin, con errores comprendidos entre el 12 y el 35% en la primera estación, que disminuye hasta el 6 – 13% en el tercer punto y que alcanza valores comprendidos entre el 4,5 y el 9% en la última estación.
- Los datos experimentales y valores modelizados del tiempo de máximo han mostrado que, en todos los casos, los tiempos del pico correspondientes a los modelos utilizados son ligeramente superiores a los valores experimentales. Este hecho se debe a que, normalmente, las curvas modelizadas son más simétricas que las experimentales, hecho que se traduce en una mayor proximidad entre los tiempos medios y del máximo, de modo que si las curvas modelizadas presenta aproximadamente el mismo tiempo medio que la experimental, sus tiempos de pico son más altos. En general para todas las distribuciones, los calculados por el modelo de Chatwin, prácticamente coinciden con los experimentales. Las distribuciones proporcionadas por los diferentes modelos utilizados han presentado resultados muy ajustados en los aspectos relativos al tiempo medio o centroide de las predicciones.

- La varianza de las curvas correspondientes a los tres modelos no han presentado diferencias sustanciales con la de las curvas experimentales.
- La comparación de los valores del coeficiente de sesgo de las curvas experimentales y modelizadas han permitido verificar que los valores del coeficiente de sesgo en las curvas de trazador correspondientes a las primeras estaciones, debido a la alta asimetría de las mismas, son difíciles de igualar por las curvas modelizadas. A medida que los puntos de muestreo se sitúan más alejados de la estación de inyección, las curvas ganan en simetría y la calidad de las predicciones mejora, como puede comprobarse por el acercamiento de los valores experimentales y modelizados del coeficiente de sesgo. El modelo que mejores resultados ha proporcionado respecto a este parámetro es el ajuste no gaussiano de Chatwin.
- Los valores del coeficiente de curtosis han presentado ciertas similitudes con los ya vistos del coeficiente de sesgo con discrepancias importantes entre valores experimentales y modelizados en los primeros puntos de muestreo que se atenúan con rapidez a medida que aumenta la distancia al punto de inyección, hasta quedar reducida a valores mínimos en las proximidades del embalse de Entrepeñas.

b) Embalse de Entrepeñas

La modelización del embalse se ha realizado con base en la caracterización hidráulica que se ha llevado a cabo en la tarea de Documentación y del análisis de la estructura de su lámina de agua realizada en la elaboración de resultados realizada dentro del marco del proyecto Tracer.

Las principales conclusiones que se pueden establecer sobre el comportamiento del embalse de Entrepeñas son las siguientes:

- El aporte más importante es el río Tajo, con un caudal medio anual de $24,86 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y una avenida máxima previsible de $1.200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El embalse lleno almacena un volumen total de agua de 890 hm^3 , con una capacidad útil de 828 hm^3 , que considerando el aporte anual antes indicado proporciona un tiempo medio de residencia de 414,36 días.
- El embalse presenta un triple aprovechamiento, la producción de energía hidroeléctrica, regadío y actividades deportivas y lúdicas. La cota máxima de embalse está situada a 720,50 m.s.n.m. y la cota mínima a 675 m.s.n.m.
- El embalse descarga a través del canal que alimenta la central hidroeléctrica de Entrepeñas y en determinados periodos de tiempo a través del canal que le pone en comunicación con el embalse de Buendía. La base de la toma de agua, situada en la margen derecha del embalse, se encuen-

tra 57,30 m por debajo de la coronación. La conducción de presión se inicia en la toma de agua y consta de dos tuberías forzadas de 62,84 m y 3 m de diámetro.

- De los resultados de las medidas experimentales realizadas dentro del proyecto Tracer, se pueden diferenciar tres secciones en el embalse.
 - La zona alta de longitud variable según el grado de llenado del embalse recibe el caudal proveniente del río Tajo.
 - La segunda zona, o zona media, tiene alternancias de zonas en las que el embalse inunda llanuras adyacente y de zonas en las que el agua ocupa el antiguo cauce del río Tajo.
 - El cuerpo principal del embalse con una longitud de 9.000 m y anchura variable comprendida entre 1.500 y 2.000 m.
- En la modelización del embalse se utiliza el modelo de Compartimentos Estratificados, con circulación de un hipotético vertido por la hipolimnium de la lámina de agua. La ecuación matemática del balance de materia es la ecuación [4.73].
- En el embalse se consideran tres puntos de interés que coinciden con el final de las zonas alta y media y con la presa del embalse.

c) Embalse de Bolarque

La modelización del embalse se ha realizado con base en la caracterización hidráulica que se ha llevado a cabo en la tarea de Documentación y del análisis de la estructura de su lámina de agua realizada en la elaboración de resultados realizada dentro del marco del proyecto Tracer.

Las principales conclusiones que se pueden establecer sobre el comportamiento del embalse de Entrepeñas son las siguientes.

- Los aportes más importantes son los ríos Tajo y Guadiela, con un aporte total medio anual de $45,15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y una avenida máxima previsible de $2.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Un tercer aporte importante es el caudal turbinado por la central hidroeléctrica Bolarque II de agua del embalse de La Bujeda. El embalse lleno almacena un volumen total de agua de $30,70 \text{ hm}^3$, con una capacidad útil de $22,81 \text{ hm}^3$, que considerando el aporte anual antes indicado proporciona un tiempo medio de residencia de 8,03 días.
- Los aportes de los ríos Tajo y Guadiela presentan un salinidad muy diferente, por lo que ambos aportes no llegan a mezclarse y el aporte del río Tajo viaja, flotando, sobre el agua aportada por el río Guadiela.
- El embalse presenta un doble aprovechamiento, la producción de energía hidroeléctrica y actividades deportivas. La cota máxima de embalse está situada a 642 m.s.n.m. y la cota mínima a 631,15 m.s.n.m.

- El embalse descarga a través del canal que alimenta la central hidroeléctrica de Bolarque I y en determinados periodos de tiempo a través de la central hidroeléctrica Bolarque II que bombea agua al embalse de La Bujeda y a través de éste hacia el trasvase Tajo-Segura. La base de la toma de agua de la central hidroeléctrica de Bolarque I, que es la que se encarga de suministrar caudal al río Tajo, situada en la margen derecha del embalse, se encuentra 42 m por debajo de la coronación. La conducción de presión se inicia en la toma de agua y consta de dos tuberías forzadas de 52,20 y 3,65 m de diámetro.
- En la modelización del embalse se utiliza el modelo de Compartimentos Segmentados, con circulación de un hipotético vertido por la epilimnium de la lámina de agua. La ecuación matemática del balance de materia es la ecuación [4.73].
- En el embalse se considera un punto de interés que coinciden con la presa del embalse.

2.2.4. Central nuclear José Cabrera

De los resultados de la caracterización hidráulica e hidrológica y experimentales de las campañas de campo realizados, en los proyectos Tracer I y II, se puede concluir que el tramo del río Tajo que puede verse afectado por un vertido de la central nuclear José Cabrera se puede esquematizar como se muestra en la figura 4.20.

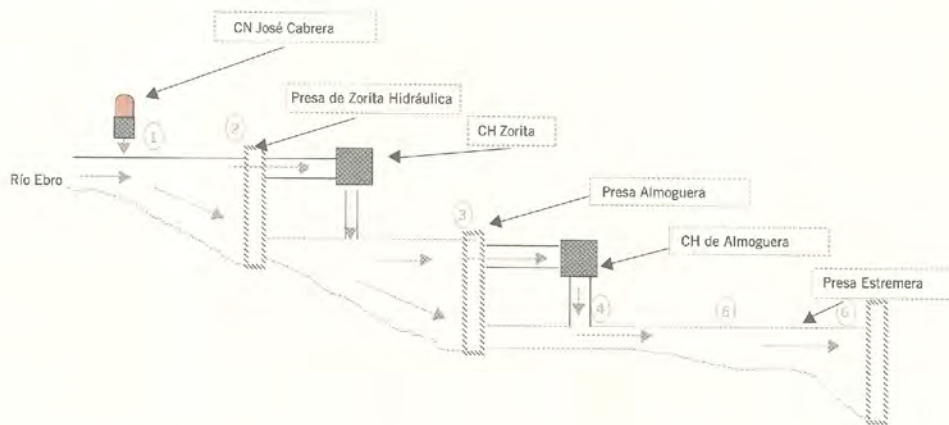


Figura 4.20. Esquema del tramo del río Tajo que puede verse afectado por vertidos de la central nuclear José Cabrera.

El estudio realizado permite establecer los siguientes tramos:

- Embalse de Zorita Hidráulica.
- Embalse de Almoduera.
- Presa de Almoduera-presa de Estremera.

a) Embalse de Zorita Hidráulica

La modelización del embalse se ha realizado con base en la caracterización hidráulica que se ha llevado a cabo en la tarea de Documentación y del análisis de la estructura de su lámina de agua realizada en la elaboración de resultados realizada dentro del marco del proyecto Tracer.

Las principales conclusiones que se pueden establecer sobre el comportamiento del embalse de Zorita Hidráulica son las siguientes.

- El aporte más importante es el río Tajo, con un caudal medio anual de $44,26 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y una avenida máxima previsible de $1.800 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El embalse lleno cubre una superficie de 57 ha y almacena un volumen total de agua de $2,60 \text{ hm}^3$, con una capacidad útil de $1,47 \text{ hm}^3$, que considerando el aporte anual antes indicado proporciona un tiempo medio de residencia de 0,68 d.
- El embalse presenta un doble aprovechamiento industrial, la producción de energía hidroeléctrica y actuar como foco frío de la central nuclear José Cabrera, lo que obliga a mantener el embalse prácticamente lleno en operación normal. La cota máxima de embalse está situada a 600 m.s.n.m. y la cota mínima a 598 m.s.n.m.
- El embalse descarga a través del canal que alimenta la central hidroeléctrica de Zorita. La base de la toma de agua, situada en la margen izquierda del embalse, se encuentra 8 m por debajo de la coronación. La conducción de presión se inicia en la galería que parte de la toma de agua, tiene una longitud de 800 m y 5,50 m de diámetro.
- La central nuclear José Cabrera extrae de forma continuada un caudal de $6,67 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para realizar funciones de refrigeración. La aspiración se realiza por medio de dos tuberías de 1,37 m de diámetro, cuyo centro se encuentra a 3 m de profundidad. Una vez utilizada, el agua es devuelta al embalse por medio de un canal superficial, que vierte aguas abajo de la aspiración.
- De los resultados de las medidas experimentales realizadas dentro del proyecto Tracer I, se pueden diferenciar tres secciones en el embalse.
 - La zona alta se extiende sobre una longitud aproximada de 6.500 m, tomando como referencia la descarga de la presa de Bolarque y se encuentra fuera del área de influencia del vertido de la central nuclear José Cabrera.
 - La segunda zona, o zona media, cubre una longitud de 1.160 m y contiene el tramo del embalse afectado de forma directa por la descarga de la central, que se manifiesta en forma de un aporte térmico y cinético al medio hídrico. La energía cinética turbulenta proporcionada por

la descarga presenta un alto grado de disipación local y sólo afecta a las condiciones de mezcla en esta zona de influencia directa. El flujo de agua procedente del río Tajo, junto con las circulaciones ocasionadas por la aspiración y descarga de agua para la refrigeración de la central nuclear, provoca la aparición de un conjunto de movimientos del agua del embalse que, en líneas generales, es semejante a las que se originan en la parte alta del embalse de Sobrón. Estos movimientos incluyen la circulación de agua fría y de alta densidad procedente del río Tajo, que mayoritariamente se mueve bajo la lámina superficial de agua calentada por la central nuclear. La laminación del vertido caliente procedente de la central nuclear José Cabrera, que se extiende sobre el medio receptor, alcanza tanto a puntos situados aguas abajo, como aguas arriba del canal de descarga.

- La tercera zona o zona baja ocupa el tramo de embalse contenido entre el final de la segunda zona y la presa del embalse, cuya longitud es de 890 m. Este área queda libre de la influencia cinética de la descarga de la central, pero no de su influencia térmica.
- En la modelización del embalse se utiliza dos modelos.
 - La zona media del embalse se modeliza mediante el modelo de Compartimentos Segmentados con recirculación, cuyo diagrama de flujo se representan en la figura 4.17. Las ecuaciones matemáticas del balance de materia son las ecuaciones [4.70] a [4.72].
 - En la zona baja del embalse se utiliza el modelo de Compartimentos Segmentados en la modelización. Su diagrama de flujo se representa en la figura 4.18. La ecuación matemática del balance de materia esta dada por la ecuación [4.73].
- En el embalse se consideran dos puntos de interés, figura 4.20.
 - Descarga de la central nuclear José Cabrera, punto 1 en la figura 4.20.
 - Presa de Zorita Hidráulica, punto 2 en la figura 4.20.

b) Embalse de Almoguera

La modelización del embalse se ha realizado con base en la caracterización hidráulica que se ha llevado a cabo en la tarea de Documentación y del análisis de la estructura de su lámina de agua realizada en la elaboración de resultados en el proyecto Tracer I.

Las principales conclusiones que se pueden establecer sobre el comportamiento del embalse de Almoguera son las siguientes:

- El embalse de Almoguera se encuentra situado aguas abajo del embalse de Zorita Hidráulica y recoge los aportes de una superficie de la cuenca del río

Tajo de 7.880 km², con un caudal medio anual de 44,26 m³ s⁻¹ y una avenida máxima previsible de 2.000 m³ s⁻¹. El embalse lleno cubre una superficie de 186 ha. El volumen total del embalse es de 6,50 hm³ y su capacidad útil de 2,90 hm³, que considerando el aporte anual antes indicado proporciona un tiempo medio de residencia de 1,70 días.

- La cota máxima de embalse está situada a 585 m.s.n.m. y la cota mínima a 583 m.s.n.m.
- El embalse descarga por un canal subterráneo de abastecimiento de agua para las mancomunidades de Mondejar, Girasol y Algador y por un canal superficial que alimenta la central hidroeléctrica de Almoguera.
- Los resultados de las medidas experimentales realizadas dentro del proyecto Tracer I, indican que el embalse presenta homogeneidad vertical durante todo el ciclo anual.
- En la modelización del embalse se utiliza el modelo de Tanques en Serie, cuyo diagrama de flujo se representa en la figura 4.19. La ecuación del balance de materia de este modelo para cada uno de los elementos del sistema está dada por la ecuación [4.73].
- En el embalse se consideran un punto de interés, punto 3 en figura 4.20, la presa de Almoguera.

b) Presa de Almoguera-presa de Estremera

Se trata de un tramo mixto en el que el agua circula por un canal, un tramo de río y por último se remansa debido a la presencia de la presa de Estremera. La longitud total del tramo es de 12.600 m. La pendiente del cauce del embalse es de 0,00123 m m⁻¹.

Los resultados obtenidos de la tarea de Documentación han permitido diferenciar en este tramo tres secciones:

- Canal de la central hidroeléctrica de Almoguera. El cauce del río Tajo, aguas abajo de la presa de Almoguera, presenta un meandro al final del cual se encuentra la salida de turbinas de la central hidroeléctrica de Almoguera. En este tramo, el cauce se ve cubierto por una lámina de agua de escaso espesor y con muy poca circulación de agua. Por lo que el mayor caudal de agua circulante lo constituye la detracción del canal de la central hidroeléctrica de Almoguera. El canal de la central hidroeléctrica de Almoguera se bifurca de la margen izquierda del embalse de Almoguera en un punto muy próximo a su presa. Se trata de un canal superficial con secciones rectangulares de 9 m de anchura al inicio y final de su desarrollo y sección trapezoidal en la parte central de su desarrollo, 5 y 15 m de anchura en la base y en el brocal, respectivamente. La profundidad máxima es de 5,75 m, tiene 1.050 m de longitud.

- Central hidroeléctrica de Almoguera-piscifactoría. A la salida de turbinas de la central hidroeléctrica de Almoguera, el agua discurre por un tramo de río en el que hay circulación de agua en forma de tabla, hasta que se ve interrumpida por un pequeño azud construido para dar servicio a una piscifactoría. La longitud de este tramo de río es de 5.145 m. La anchura del cauce sumergido, medida con distanciómetro de Lasser, oscila alrededor de los 50 m. Se trata de una zona de pequeña profundidad.
- Piscifactoría - presa de Estremera. El tramo está constituido por el propio embalse de Estremera.
- La capacidad total del embalse es $0,5 \text{ hm}^3$, con una capacidad útil de $0,45 \text{ hm}^3$ y una superficie de 28 ha.
- La cota máxima del embalse es de 565,65 m.s.n.m. y la cota mínima de explotación de 563,50 m.s.n.m. En las campañas de campo se ha observado que la cota de agua del embalse permanece constante durante el periodo de invierno en un valor de 564,20 m.s.n.m. Cuando comienza la época de regadío el nivel de agua aumenta hasta que ésta rebosa por el borde superior de la presa.
- En el embalse existen diferentes puntos de consumo. Algunos de ellos son fijos como la toma de la piscifactoría, la de abastecimiento de la localidad de Leganiel y la de una explotación ganadera y las detracciones de agua por la margen derecha de dos acequias y del propio canal de Estremera. Otras son temporales.
- Los resultados de las medidas experimentales y las características de la estructura de la lámina de agua indican que el embalse presenta homogeneidad vertical durante todo el ciclo anual.
- En la modelización del embalse se utilizan tres modelos.
 - Debido a la baja capacidad de dispersión y dilución que presenta el canal de la central hidroeléctrica de Almoguera, esta sección se ha considerado como un elemento tubular que solamente introduce un retraso en la entrada de la mancha de vertido al embalse, siguiente sección. El retraso introducido viene dado por el tiempo de residencia del agua en el canal, V/Q .
 - El tramo de río se ha modelizado mediante el modelo de Tanques en Serie. El diagrama de flujo del modelo se muestra en la figura 4.19. La ecuación matemática del balance de materia está dada por la ecuación [4.73]. La determinación exacta del coeficiente de dispersión habría requerido la utilización de trazador. La escasa turbulencia de la corriente, la geometría del vaso y la pequeña longitud del tramo no permiten el alcanzar la longitud de mezcla. Además la presencia de la piscifactoría, a pocos kilómetros aguas abajo de la salida de turbinas de la central hidroeléctrica, habría podido ocasionar alarma social. La semejanza entre las características morfológicas de

este tramo de río con las de la última parte del tramo de río que existe aguas abajo de la central nuclear de Trillo ha permitido estimar el coeficiente de dispersión a partir de los resultados obtenidos en la campaña de trazadores realizadas dentro del proyecto Tracer I.

- En la modelización del tramo piscifactoría-presa de Estremera se ha empleado el modelo de Tanques en Serie. El diagrama de flujo del modelo se muestra en la figura 4.19. La ecuación matemática del balance de materia está dada por la ecuación [4.73].
- En el embalse se consideran tres puntos de interés, punto 4 en figura 4.20.
 - Descarga de la central hidroeléctrica de Almoguera, punto 5 en figura 4.20.
 - Presa de toma de agua de la piscifactoría.
 - Presa de Estremera, punto 6 en figura 4.20.

2.2.5. Central nuclear Almaraz

De los resultados de la caracterización hidráulica e hidrológica y experimentales de las campañas de campo realizadas, se puede concluir que el tramo del río Tajo que puede verse afectado por un vertido de la central nuclear de Almaraz se puede esquematizar como se muestra en la figura 4.21.

El estudio realizado permite establecer los siguientes tramos:

- Embalse caliente de Arrocampo.
- Embalse frío de Arrocampo.
- Embalse de Torrejón-Tajo.

a) *Subembalse caliente de Arrocampo*

En este informe se denomina embalse caliente a la zona del embalse de Arrocampo en la que avana el canal de descarga de la central nuclear de Almaraz. Se extiende desde este punto hasta la presa del embalse y se encuentra separado del resto del embalse, embalse frío, por una pared separadora.

La modelización del embalse se ha realizado con base en la caracterización hidráulica que se ha llevado a cabo en la tarea de Documentación y del análisis de la estructura de su lámina de agua realizada en la elaboración de resultados.

Las principales conclusiones que se pueden establecer sobre el comportamiento del embalse caliente de Arrocampo son las siguientes:

- El aporte más importante es el canal de descarga de la central nuclear, con un caudal en operación normal de la central nuclear de $92,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El embalse lleno cubre una superficie de 605,5 ha y almacena un volumen total de agua de $25,772 \text{ hm}^3$, que considerando el aporte medio antes indicado proporciona un tiempo medio de residencia de 77 h.

- El único aprovechamiento del embalse es como foco frío de la central nuclear de Almaraz, lo que obliga a mantener el embalse prácticamente lleno en operación normal. La cota de agua es prácticamente constante e igual a 255 m.s.n.m.
- La operación de descarga del subembalse puede realizarse de dos formas diferentes. Si la temperatura del agua en las proximidades de la presa es inferior a 27 °C, condición que ocurre en épocas frías, la descarga del embalse es de profundidad y se recircula el agua al embalse frío. Si la temperatura del agua en las proximidades de la presa es superior a los 27 °C, parte del agua se descarga por superficie hacia el embalse de Torrejón-Tajo, el resto se recircula al embalse frío. La constancia de cota de agua en el embalse obliga a que el caudal vertido sea el mismo que el descargado por la central nuclear.
- Los resultados de las medidas experimentales y del análisis de la estructura de la lámina de agua indican que el embalse presenta una alta homogeneidad vertical y transversal a lo largo de todo el ciclo anual. Debido a ello solamente se considera una zona en el subembalse.
- En la modelización del embalse se utiliza un modelo de Tanques en Serie en el que se considera, que en la alimentación puede existir recirculación de actividad debida a la recirculación de agua del propio embalse a través del embalse frío. El diagrama de flujo se representa en la figura 4.22. Las ecuaciones matemáticas del balance de materia es la ecuación [4.73], con la particularidad de que en caso de recirculación la alimentación del primer tanque es la corriente de salida del embalse frío, más el posible vertido contaminante.
- En el embalse se consideran dos puntos de interés, figura 4.21.
 - Descarga de la central nuclear de Almaraz, punto 1 en la figura 4.21.
 - Presa de Arrocampo, punto 2 en la figura 4.21.

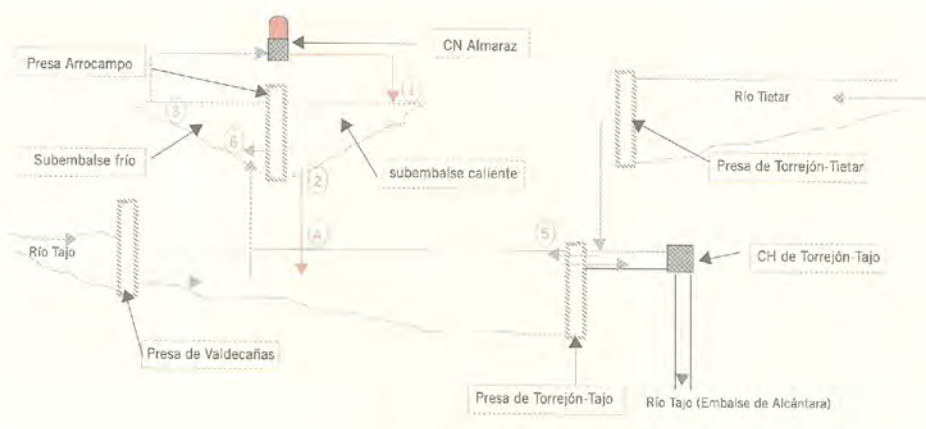
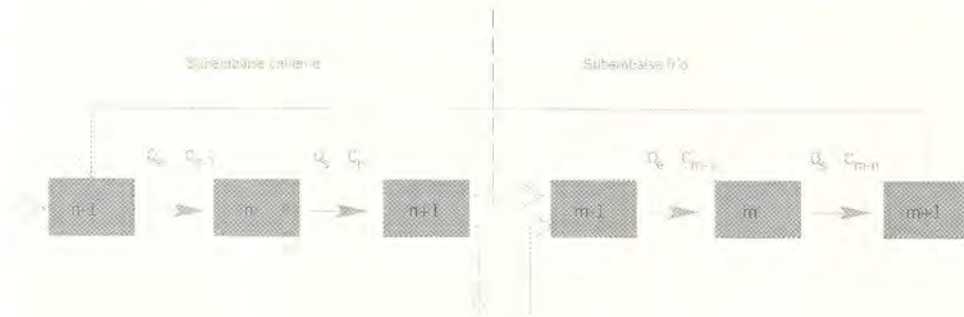


Figura 4.21. Esquema del tramo que puede verse afectado por vertidos de la central nuclear de Almaraz.

Figura 4.22.
Diagrama de flujo
de los embalses
caliente y frío
de Arrocampo.



b) Embalse frío de Arrocampo

En este informe se denomina embalse frío a la zona de Arrocampo comprendida desde su toma de agua, coincide con la posición de su presa, hasta la toma de agua de la central nuclear. Como ya se ha indicado más arriba, se encuentra separado del resto del embalse, embalse caliente, por una pared separadora.

La modelización del embalse se ha realizado con base en la caracterización hidráulica que se ha llevado a cabo en la tarea de Documentación.

Las principales conclusiones que se pueden establecer sobre el comportamiento del subembalse frío de Arrocampo son las siguientes.

- Dependiendo de la temperatura del agua en el subembalse caliente, el aporte puede ser único del subembalse caliente o mixto desde éste y desde el embalse de Torrejón-Tajo. La constancia de la cota de agua en el embalse obliga a que el caudal total aportado, bien por el embalse caliente o el total aportado por éste y el embalse de Torrejón-Tajo, sea igual al tomado por la central nuclear, en operación normal de la central nuclear de $92,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El embalse lleno cubre una superficie de $86,8 \text{ ha}$ y almacena un volumen total de agua de $8,32 \text{ hm}^3$, que considerando el aporte medio antes indicado proporciona un tiempo medio de residencia de $24,9 \text{ h}$.
- El único aprovechamiento del embalse es el suministro de agua a la central nuclear de Almaraz, lo que obliga a mantener el embalse prácticamente lleno en operación normal. La cota de agua es prácticamente constante e igual a 255 m.s.n.m.
- La descarga del embalse frío es la toma de agua de la central nuclear, en operación normal de la central nuclear de $92,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.
- No se han realizado medidas en el embalse frío, sin embargo, la morfología de su vaso y las características de los aportes hacen suponer que su lámina de agua se puede considerar con homogeneidad vertical y transversal a lo largo de todo el ciclo anual. Debido a ello solamente se considera una zona en el embalse.

- En la modelización del embalse se utiliza un modelo de Tanques en Serie en el que se considera, que en la alimentación puede provenir exclusivamente del subembalse caliente o de ambos embalse caliente y embalse de Torrejón-Tajo. El diagrama de flujo se representa en la figura 4.22. La ecuación matemática del balance de materia es la ecuación [4.73], con la particularidad de que en caso de recirculación la alimentación del primer tanque es la corriente de salida del subembalse frío, más el aporte del embalse de Torrejón-Tajo.
- En el embalse se consideran dos puntos de interés, figura 4.21.
 - Presa de Arrocampo, punto 6 en la figura 4.21.
 - Toma de agua de la central nuclear de Almaraz, punto 3 en la figura 4.21.

c) Embalse de Torrejón-Tajo

La modelización del embalse se ha realizado con base en la caracterización hidráulica que se ha llevado a cabo en la tarea de Documentación.

Las principales conclusiones que se pueden establecer sobre el comportamiento del embalse Torrejón-Tajo son las siguientes.

- El embalse presenta tres aportes. Central hidroeléctrica de Valdecañas y embalses de Arrocampo y Torrejón-Tietar. El aporte de Arrocampo no debe ser considerado en el balance global de agua, ya que la cantidad vertida desde el embalse de Arrocampo es igual a la tomada por este embalse del embalse de Torrejón-Tajo. La salida de agua tiene lugar a través de las turbinas de la central hidroeléctrica del propio embalse. En los planos topográficos de la zona aparece representado un canal de regadío situado aguas arriba de la toma de agua y de la descarga del embalse de Arrocampo, sin embargo, consultadas diferentes fuentes, parece que en la actualidad se encuentra en desuso. Los caudales de cada una de las entradas y de la salida son muy variables. El bombeo desde el embalse de Torrejón-Tietar es intermitente y su caudal oscila entre 0 y $89 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El caudal medio de bombeo es de $12,27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El aporte de la central hidroeléctrica de Valdecañas es el más importante, su caudal medio es de $54,53 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. No obstante el caudal de este aporte es muy irregular, pudiendo pasar de valores de unos pocos $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ a valores del orden de más de $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Los máximos valores se alcanzan entre finales de los meses de octubre y noviembre. La salida de agua del embalse tiene lugar esencialmente por turbinación de la central hidroeléctrica instalada en el embalse. Al igual que en las entradas, el caudal es poco uniforme pudiendo pasar de valores de unos pocos $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ a valores del orden de más de $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, su caudal medio es de $65,83 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.
- El volumen medio de agua embalsada es de $156,96 \text{ hm}^3$. Presenta variaciones con valores máximos y mínimos de $162,31$ y $150,01 \text{ hm}^3$.

- La cota media de la superficie del agua medida sobre el nivel del mar es 241,86 m.s.m.m. con valores máximo y mínimo de 242,14 m.s.m.m. y 240,85 m.s.m.m. Por lo que la máxima variación de este parámetro es de 1,29 m.
- Las propiedades del agua de los dos aportes principales son muy diferentes. El agua que procede del embalse de Valdecañas presenta una conductividad alta, próxima a $1.000 \mu\text{S cm}^{-1}$, mientras que la proveniente de Torrejón-Tietar presenta una conductividad muy baja, $200 \mu\text{S cm}^{-1}$. También existe gran diferencia en la temperatura del agua. La temperatura de agua de Torrejón-Tietar es más baja que la del agua contenida en el propio embalse de Torrejón-Tajo. Estas diferencias afectan a la densidad y, por tanto, a las fuerzas de flotabilidad del agua. El hecho de que el agua de Torrejón-Tietar presente baja conductividad eléctrica indica que su salinidad es baja, por lo que a igualdad de temperatura, el agua aportada por el embalse de Torrejón-Tietar debería flotar sobre la contenida en el embalse de Torrejón-Tajo. Por otra parte, si la temperatura del agua aportada por el embalse de Torrejón-Tietar es mucho menor que la del embalse Torrejón-Tajo, la densidad de la primera sería mayor y tendería a sumergirse por debajo del agua contenida en el embalse de Torrejón-Tajo. Si bien la densidad del agua es más sensible a la temperatura que a la salinidad, el comportamiento del embalse, en su zona más próxima al aporte de Torrejón-Tietar, dependerá de las condiciones ambientales. Este comportamiento también está afectado por energías externas que se introducen en el sistema debido a las operaciones de bombeo y turbinación.
- Es un embalse que por su volumen de agua embalsada (capacidad media $156,964 \text{ hm}^3$) y profundidad en sus zonas alta y media (máxima profundidad en la zona de la presa de 50 m y profundidad media de las zonas alta y media de 32 m) debería esperarse que se produjera estratificación. Sin embargo, la presencia de termoclina natural está condicionada por la operación de las centrales hidroeléctricas y centrales de bombeo instaladas en el embalse.
- De los resultados de las medidas experimentales se puede concluir que la descarga del embalse de Arrocampo afecta al comportamiento del agua del embalse de Torrejón-Tajo a lo largo de toda la longitud de este embalse. El aporte de Arrocampo origina estratificación artificial. El agua más caliente descargada desde el embalse de Arrocampo flota sobre la contenida en el embalse de Torrejón-Tajo aguas arriba de la descarga. El espesor de la capa superficial más caliente varía con la distancia al avenamiento de la descarga de Arrocampo y con la operación de las centrales hidroeléctricas instaladas

en el embalse. El espesor máximo en la sección de dicho avenamiento y disminuye aguas arriba. Aguas abajo de la descarga tiene lugar un proceso de mezcla vertical de forma que el agua descargada se mezcla con la del embalse. En las zonas próximas a la presa, la homogeneidad vertical de la masa de agua puede desaparecer por operación de la central hidroeléctrica instalada en la presa del embalse. Así, si la central hidroeléctrica del embalse se encuentra en operación de bombeo de agua del embalse de Torrejón-Tietar, la lámina de agua se puede fragmentar debido a la mayor densidad del agua bombeada. Por otra parte, si la central hidroeléctrica de Torrejón-Tajo se mantuviera inactiva durante un largo periodo de tiempo dentro del tiempo en que se produce estratificación natural (verano-principios de otoño), la lámina de agua podría sufrir estratificación. Salvo las condiciones de operación comentadas anteriormente, se puede considerar que la lámina de agua que ocupa el cuerpo principal del embalse no se encuentra fragmentada.

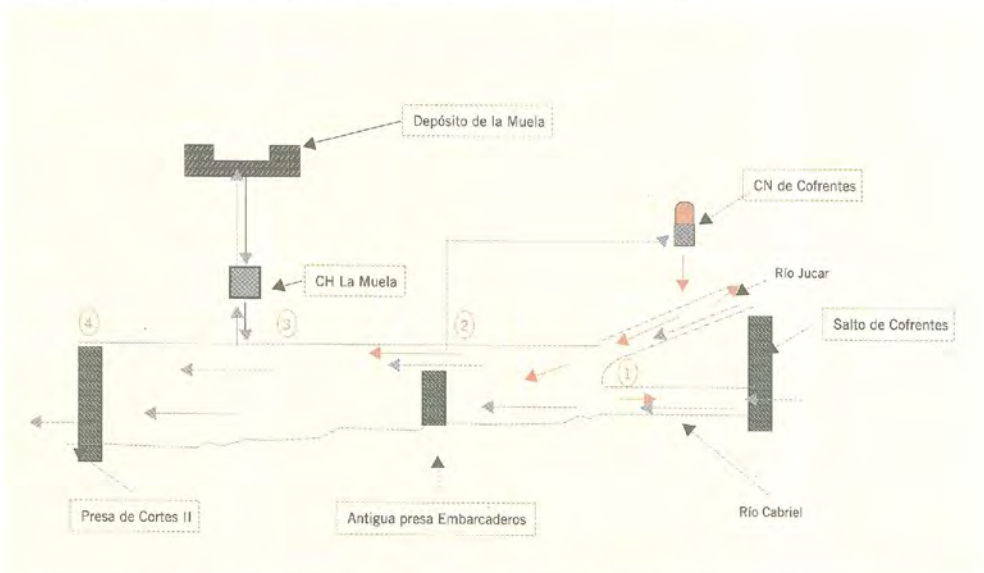
- Desde el punto de vista de la modelización, en el embalse de Torrejón-Tajo se han considerado dos tramos.
 - Zona alta del embalse. El tramo denominado “zona alta del embalse” se extiende desde el avenamiento de la descarga del embalse de Arrocampo, situado a 29.300 m de la presa del embalse, hasta la presa de Valdecañas, situada a 37.100 m de la presa del embalse de Torrejón-Tajo. Por tanto, tiene una longitud de 7.800 m. En este tramo el vaso del embalse se encuentra ocupado por agua que proviene del embalse de Valdecañas y por agua procedente de la descarga del embalse de Arrocampo, que avanza en contracorriente y flotando sobre el agua procedente del embalse de Valdecañas. Por ello, en su modelización se ha utilizado el modelo de Compartimentos Segmentados con Recirculación. El diagrama de flujo se representa en la figura 4.17. Las ecuaciones matemáticas del balance de materia son las ecuaciones [4.70] a [4.72].
 - Cuerpo principal del embalse. El tramo denominado “cuerpo principal del embalse” abarca desde el final del tramo anterior (avenamiento de la descarga del embalse de Arrocampo) hasta la presa del embalse. Su longitud es de 29.300 m. En este tramo el agua procedente de la descarga de Arrocampo circula a lo largo del embalse con un cierto grado de mezcla en toda la lámina de agua del embalse, salvo en condiciones de operación de la central hidroeléctrica de Torrejón-Tajo particulares. Debido a este tipo de circulación, la modelización del tramo se realiza mediante el modelo de Tanques en Serie. El diagrama de flujo se representa en la figura 4.19. La ecuación matemática del balance de materia es la ecuación [4.73].

- Con base en la caracterización hidráulica realizada y en las conclusiones obtenidas de las campañas experimentales, se establecen dos puntos de interés en el embalse.
 - Avenamiento de la descarga del embalse de Arrocampo. Situado a 29.300 m de la presa del embalse, punto 4 en la figura 4.21.
 - Presa del embalse, punto 5 en la figura 4.21.
- No se considera como punto de interés la toma de agua del embalse de Arrocampo. Dicha toma de agua se encuentra situada en profundidad. En esta sección, el embalse presenta una profundidad de alrededor de 16 m, y el espesor de la capa de agua proveniente de la descarga de Arrocampo es de 8 m como máximo, por lo tanto el agua bombeada hacia Arrocampo tiene como origen el embalse de Valdecañas. Tampoco se toma como punto de interés la toma de agua del canal de regadío, ya que se encuentra en desuso.

2.2.6. Central nuclear de Cofrentes

De los resultados de la caracterización hidráulica e hidrológica y experimental de las campañas de campo realizadas, se puede concluir que el tramo del río Júcar que puede verse afectado por un vertido de la central nuclear de Cofrentes se puede esquematizar como se muestra en la figura 4.23.

Figura 4.23.
Esquema de la zona de influencia de la central nuclear de Cofrentes.



Desde el punto de vista de la modelización, en el embalse de Cortes II se han considerado cuatro tramos:

- Río Júcar.
- Zona alta del embalse.
- Zona media del embalse.
- Cuerpo principal del embalse.

a) Río Júcar

El tramo denominado río Júcar ocupa un tramo del antiguo cauce de este río que se extiende 2.000 m aguas arriba y 200 m aguas abajo del avenamiento del canal de descarga de la central nuclear.

- El caudal del río Júcar en cualquier época del ciclo anual es muy bajo entre 200 y 300 l s⁻¹. Este bajo caudal es debido a la presencia, aguas arriba, de la presa de El Molinar. Desde dicha presa desvía el agua hacia el Salto de Cofrentes, construido sobre el río Cabriel, y solamente es vertida al río Júcar una pequeña cantidad de agua para mantener una fina película de agua en el cauce del río y mantener llenas las pozas.
- El límite del tramo de influencia de la central nuclear, aguas arriba del avenamiento de su canal de descarga, se ha fijado en función de medidas de conductividad eléctrica del agua realizadas en diferentes campañas en las que se detectó que para distancias superiores a 2.000 m no existía aumento en el valor de dicha variable. El límite aguas abajo se ha fijado en función de los perfiles longitudinales de conductividad eléctrica medidos a lo largo de las campañas. La conductividad eléctrica permanece prácticamente constante en los 200 m situados aguas abajo del avenamiento del canal.
- La modelización se realiza como un solo Tanque, debido al bajo caudal del río Júcar y al pequeño volumen de agua fresca que contiene el cauce. El diagrama de flujo se representa en la figura 4.24. La ecuación matemática del balance de materia es la ecuación [4.73].
- Con base en la caracterización hidráulica realizada y en las conclusiones obtenidas de las campañas experimentales, se establece un punto de interés en el tramo:
 - Final del tramo, punto 1 en la figura 4.23.

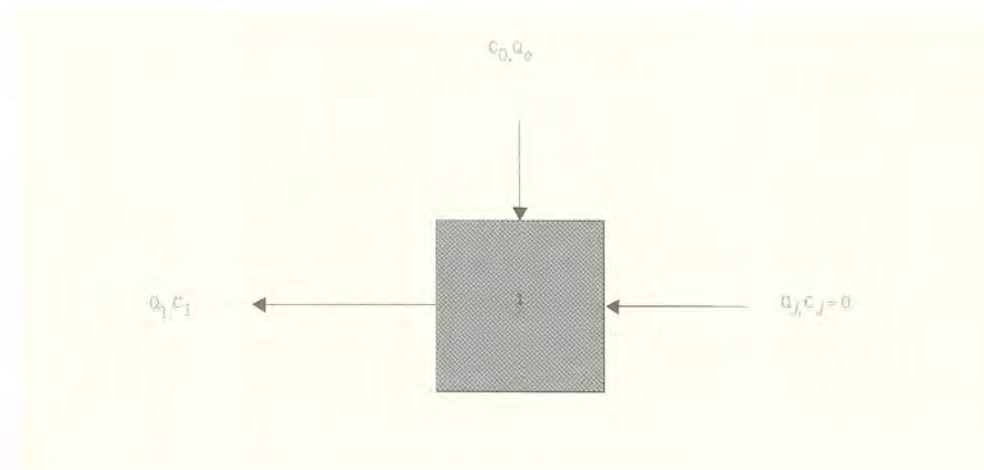


Figura 4.24.
Diagrama de flujo del modelo de un tanque de mezcla completa.

b) Zona alta del embalse

El tramo denominado “zona alta” abarca la parte del embalse constituida por el antiguo cauce del río Júcar desde el final del tramo denominado “Río Júcar”, la parte del embalse constituida por el antiguo cauce del río Cabriel y el propio embalse hasta la antigua presa de Embarcaderos.

- Este tramo del embalse presenta un vaso de poca profundidad y fondo relativamente plano. El principal aporte del embalse es el agua turbinada por el salto de Cofrentes que avena al embalse por el antiguo cauce del río Cabriel. El caudal medio aportado es $23,07 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, con caudales máximo y mínimo de $76,5$ y $0 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente. Al final de esta zona se encuentra situada la toma de agua de la central nuclear de Cofrentes.
- Las medidas experimentales de temperatura y conductividad eléctrica del agua así como los valores calculados de densidad, frecuencia de estabilidad y coeficientes de difusión indican que el comportamiento del sistema está muy influenciado por la operación del salto de Cofrentes y la descarga de la central nuclear, pero, en general, la mezcla entre aguas de diferente procedencia no es buena en ninguna de las tres direcciones del espacio, sin embargo, no se aprecia segmentación en la lámina de agua.
- En la modelización de este tramo del embalse se ha utilizado un modelo de Tanques en Serie. El diagrama de flujo se representa en la figura 4.19. La ecuación matemática del balance de materia es la ecuación [4.73].
- Con base en la caracterización hidráulica realizada y en las conclusiones obtenidas de las campañas experimentales, se establece un punto de interés en el tramo:
 - Presa de Embarcaderos. Esta sección es prácticamente la misma que la de toma de agua de la central nuclear, punto 2 en la figura 4.23.

c) Zona media del embalse

La zona media del embalse se extiende desde la antigua presa de Embarcaderos hasta el ensanchamiento donde comienza el cuerpo principal del embalse.

- Esta sección se encuentra a 2.350 m de la presa Cortes II. La forma del vaso del embalse en esta zona es en forma de V con profundidad que aumenta con la proximidad a la presa de Cortes II. En la zona más próxima al final del tramo el agua inunda un valle anejo al embalse formándose en entrante de mayor anchura y menor profundidad que el vaso principal. No se ha observado acumulación de materia ni energía en dicho ensanchamiento.

- Las medidas experimentales de temperatura y conductividad eléctrica del agua así como los valores calculados de densidad, frecuencia de estabilidad y coeficientes de difusión indican que la mezcla en las direcciones vertical y trasversal es significativamente mejor en este tramo del embalse que en la zona alta.
- No existe estratificación térmica ni química. Por lo que el agua que rebasa la antigua presa de Embarcaderos se distribuye en toda la lámina de agua de la zona que se está describiendo.
- El agua que ocupa el entrante descrito unas frases más arriba presenta las mismas características que el agua que ocupa el vaso principal del embalse.
- El modelo dinámico que se ha utilizado en la modelización es el de Tanques en Serie. El diagrama de flujo se representa en la figura 4.19. La ecuación matemática del balance de materia es la ecuación [4.73].
- Con base en la caracterización hidráulica realizada y en las conclusiones obtenidas de las campañas experimentales, se establecen un punto de interés en el tramo:
 - Final del tramo, punto 3 en la figura 4.23.

d) Cuerpo principal del embalse

El cuerpo principal del embalse abarca la zona comprendida entre el final de la zona media y la presa del embalse.

- Es la zona más ancha y profunda del embalse y la que contiene gran parte del agua embalsada.
- El tiempo medio de residencia del agua en el embalse Cortes II es de 54,91 d. El espesor de la lámina de agua y el tiempo de residencia indican que es un embalse en el que es esperable que tenga lugar estratificación natural.
- En su margen derecha se encuentra la toma y descarga del depósito de La Muela. Este depósito presenta una cota máxima de 830,98 m.s.m.m. y cota mínima de 816,25 m.s.m.m. que corresponden a un volumen máximo y mínimo de agua embalsada de 19,1 y 4,27 hm³. El volumen medio de agua embalsada es de 12,94 hm³. Los caudales de entrada y salida son similares. El caudal de entrada y salida medios son de 18,54 y 18,26 m³ s⁻¹, respectivamente. Los caudales máximos de entrada y salida son 76,9 y 79,7 m³ s⁻¹, respectivamente. Ambos caudales de entrada y salida son muy irregulares en su cuantía presentando fuertes oscilaciones. El tiempo medio de residencia del depósito es de 8,08 d. Debido a que los caudales de entrada y salida son muy próximos, en el depósito de La Muela puede existir recirculación de actividad, pero no es esperable que exista acumulación. Por lo que las detracciones y aportaciones a y desde dicho depósito no se consideran en la modelización del embalse de Cortes II.

- De las medidas experimentales de temperatura y conductividad eléctrica del agua así como de los valores calculados de densidad, frecuencia de estabilidad y coeficientes de difusión se puede concluir que el cuerpo principal del embalse de Cortes II sufre estratificación natural.
- De la evolución de la densidad calculada con la distancia a la presa se deduce que el agua que procede del tramo anterior, zona media, viaja por la lámina superior de agua durante el periodo de estratificación.
- En las capas más profundas de agua existe acumulación de agua de mayor conductividad eléctrica, lo que hace que se detecte la presencia de una picnoclina en cualquier época del año. Sin embargo, la frecuencia de estabilidad de dicha picnoclina es baja por lo que no afecta de forma importante a la difusión vertical y se considera que en época de no estratificación natural el agua que proviene del tramo anterior, zona media, se mezcla en toda la masa de agua que llena la zona baja del embalse.
- Sobre la base de las consideraciones anteriores en la modelización de este tramo del embalse se ha utilizado el modelo de Compartimentos Estratificados, con circulación de un hipotético vertido por la epilimnium de la lámina de agua. El diagrama de flujo se representa en la figura 4.18. La ecuación matemática del balance de materia es la ecuación [4.73].
- Con base en la caracterización hidráulica realizada y en las conclusiones obtenidas de las campañas experimentales, se establece un punto de interés en el tramo:
 - Presa de Cortes II, punto 4 en la figura 4.23.

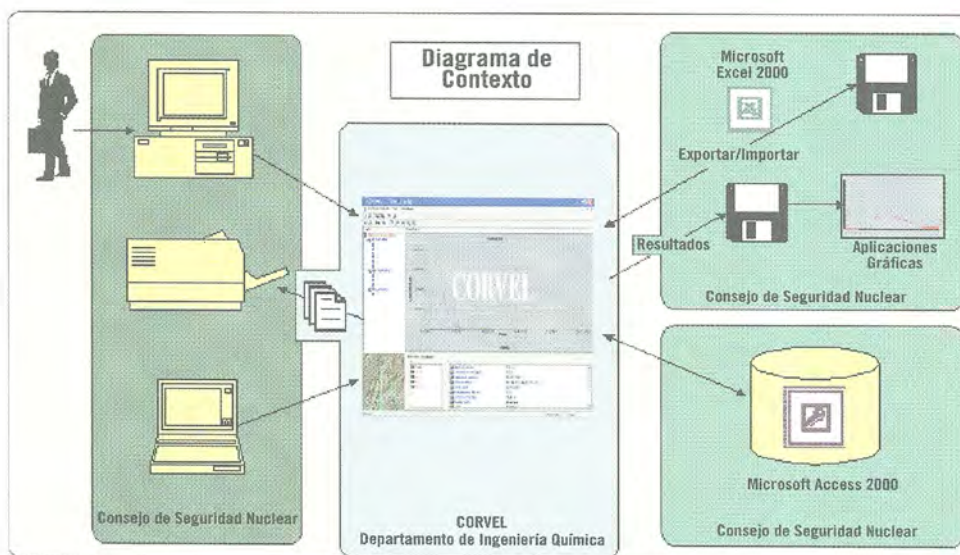
El código CORVEL

1. INTRODUCCIÓN

Dentro del marco del proyecto Tracer II se ha remodelado la estructura interna del código y se han diseñado e implementado nuevas interfaces que facilitan y agilizan la introducción de datos en tiempo real y la presentación de resultados.

El diagrama de contexto del código CORVEL, figura 5.1, muestra las relaciones del sistema con los elementos externos, marcando además el alcance del proyecto.

Figura 5.1.
Diagrama de contexto del código CORVEL



El proyecto CORVEL no sólo engloba el sistema software de simulación de vertidos nucleares en aguas interiores, sino todos aquellos elementos necesarios para la ejecución de este software, bien sean elementos software, hardware u otros.

Como único elemento externo, se encuentra el usuario de la aplicación. No existen diferentes perfiles de usuario por lo que cualquier usuario tiene acceso completo a todas las funcionalidades que el software ofrece.

Entre los elementos hardware se encuentran:

- Computadora: necesaria para la ejecución del software. Deberá tener la potencia suficiente para ejecutar de forma óptima el software, del mismo modo, deberá tener suficiente espacio libre en disco como para almacenar todas los datos correspondientes a las simulaciones efectuadas, informes, etc.
- Impresora: no es estrictamente necesaria para la ejecución del sistema, pero si lo es para la impresión de los informes de resultados que el software CORVEL genera.

Entre los elementos software necesarios se encuentran:

- Base de datos: la base de datos soporte de todos los datos generados por el sistema software es del tipo *Microsoft Access* en su versión 2000. Es por tanto imprescindible que el software *Microsoft Access 2000* esté correctamente instalado en cualquier computador desde el que se ejecute el software CORVEL.
- Software de exportación/importación: para la exportación e importación de las simulaciones de vertidos efectuadas, es necesario que el software *Microsoft Excel 2000* esté correctamente instalado en cualquier computador desde el que se ejecute el software CORVEL.
- Aplicaciones Gráficas: la funcionalidad de extracción de resultados del software CORVEL permite generar ficheros de resultados que pueden ser visualizados en aplicaciones gráficas externas.

2. DESCRIPCIÓN FUNCIONAL DEL SISTEMA

El sistema se estructura en cuatro niveles como se indica en la figura 5.2.

a) *Aplicación. Nivel 0*

El sistema de más alto nivel, nivel 0, representa la aplicación en su totalidad y contiene todas las funcionalidades de la misma. Puesto que el sistema CORVEL engloba todas las funcionalidades existentes, también hace uso de todos los almacenes o repositorios de datos existentes.

A grandes rasgos, el sistema CORVEL haciendo uso de la información de isótopos, ríos y embalses disponible, efectúa la simulación de un vertido nuclear generando valores de concentración de isótopos en el tiempo. Estos valores son almacenados en el repositorio de datos *Vertidos* para su posterior consulta, figura 5.2.

Además permite gestionar los datos disponibles de centrales nucleares e isótopos.

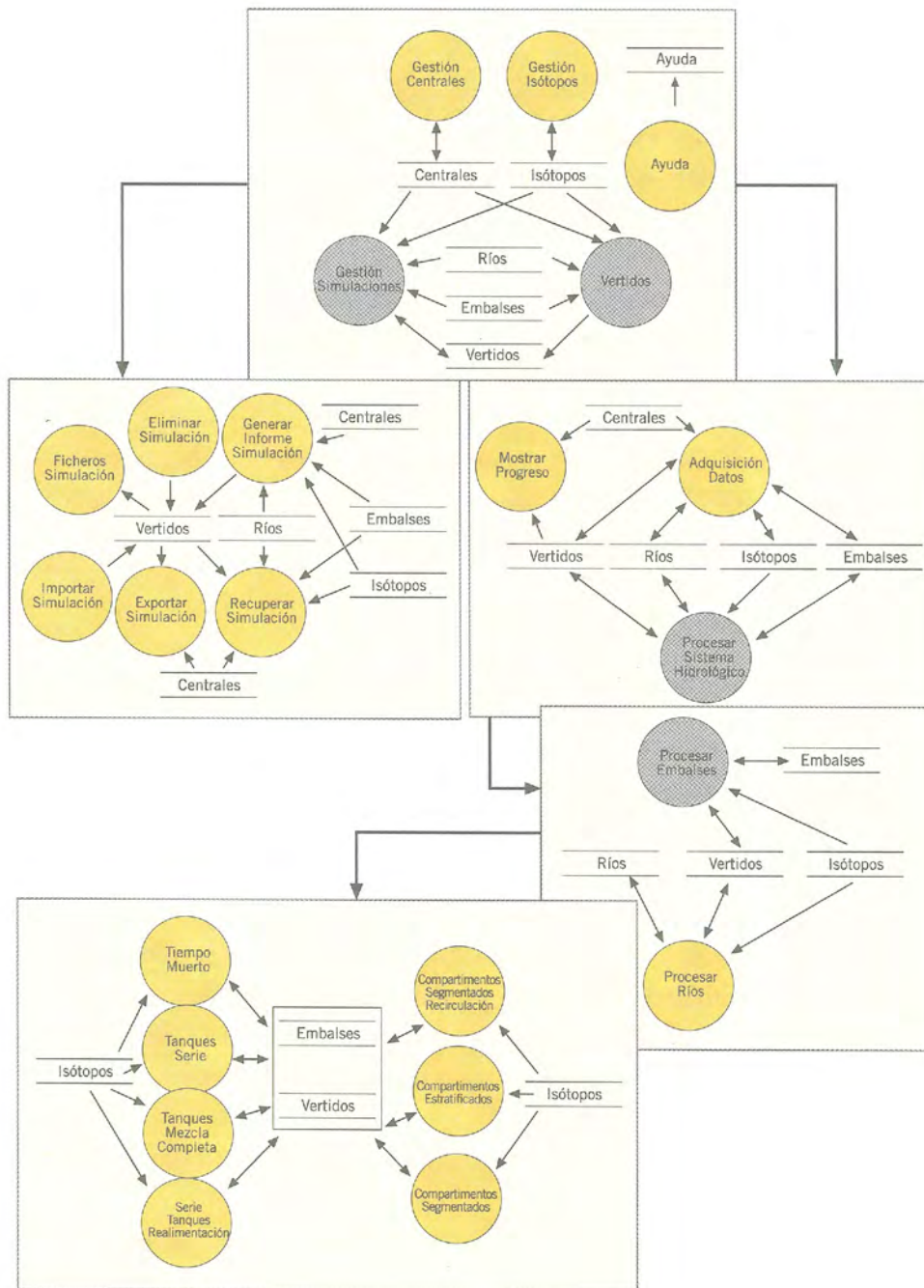
El sistema CORVEL se subdivide en las unidades o los subsistemas funcionales más específicos y especializados que se describen en los subapartados siguientes.

b) *Sistema CORVEL. Nivel 1*

Como ya se ha apuntado, el sistema *Aplicación* puede descomponerse en unidades funcionales más específicas y por tanto de mayor especialización y menor tamaño:

El sistema CORVEL se puede descomponer en las siguientes unidades funcionales, figura 5.2:

Figura 5.2.
Esquema de los niveles del sistema CORVEL



- *Gestión Centrales:* dentro de esta unidad funcional está encapsulada la gestión de los datos de las centrales nucleares que la aplicación maneja. De esta forma se podrán dar de alta, modificar o eliminar centrales nucleares. Esta unidad funcional sólo hace uso del almacén *Centrales* y no se subdividirá en otras unidades funcionales de rango inferior.

- *Gestión Isótopos*: este subsistema está encargado de la gestión de los isótopos que están presentes en los vertidos nucleares a simular. Se podrá dar de alta, modificar o eliminar los isótopos disponibles. El subsistema *Gestión Isótopos* sólo hace uso del almacén *Isótopos* y no se subdividirá en otras unidades funcionales de rango inferior.
- *Ayuda*: este sistema es el encargado de mostrar la ayuda, para facilitar el uso de la aplicación al usuario final. Tampoco se subdividirá en otras unidades de inferior rango.
- *Vertidos*: es la unidad funcional que contiene la mayor parte de la lógica de la aplicación. Dada su complejidad se subdividirá en otras unidades más específicas y manejables. Hace uso de la gran mayoría de los almacenes de datos existentes. La mayoría de estos almacenes son consultados en modo lectura. Esta unidad funcional es la encargada de efectuar la simulación de los vertidos nucleares, siendo por tanto la unidad que procesa la información de ríos, embalses e isótopos para obtener los valores de concentración en el tiempo resultado de la simulación, valores que son almacenados en el almacén de datos *Vertido*.
- *Gestión Simulaciones*: la función principal de esta unidad es procesar los resultados generados por la unidad funcional *Vertidos*, mostrando estos de forma gráfica, facilitando así la interpretación de los mismos. A parte de esta funcionalidad, esta unidad funcional encapsula varias funcionalidades más, razón por la que es subdividida.

c) Subsistema Gestión Simulaciones. Nivel 2

El subsistema *Gestión Simulaciones* puede dividirse a su vez en los siguientes subsistemas, mucho más específicos que el anterior, figura 5.2:

- *Ficheros Simulación*: este subsistema es el encargado de la extracción de los resultados (Concentración-Tiempo) de una simulación, para su uso en otras aplicaciones gráficas externas al sistema CORVEL.
- *Eliminar Simulación*: como su nombre indica, este subsistema encapsula la funcionalidad de eliminación de simulaciones que estando almacenadas en el sistema han perdido su interés.
- *Exportar Simulación*: esta funcionalidad permite extraer todos los datos de una simulación, datos que quedan almacenados en el sistema de ficheros del computador, y que posteriormente pueden ser importados para visualizarlos de nuevo. De esta forma se reduce la carga de la base de datos, se optimiza el rendimiento del sistema y se pueden compartir con otros usuarios las simulaciones efectuadas en un computador.
- *Importar Simulación*: la importación de simulaciones es la operación inversa de la exportación. De esta forma se permite restaurar en el sistema los datos de una simulación previamente exportada.

- *Informe Simulación*: genera un informe con los datos más significativos de una simulación. El informe contiene no sólo datos referentes a los resultados, sino también datos de los parámetros de entrada bajo los que se ha efectuado la simulación, datos descriptivos del sistema hidrológico afectado por el vertido, etc. Este informe puede imprimirse y/o guardarse en diferentes formatos.
- *Recuperar Simulación*: este subsistema es el encargado de a partir de los resultados de una simulación, generar las curvas concentración-tiempo que permitan una rápida y efectiva interpretación de los resultados obtenidos. Además de la generación de las curvas concentración-tiempo, el subsistema mostrará toda la información precisa sobre la simulación, el sistema hidrológico en el que se ha dado.

Los almacenes de datos que son origen o destino de los datos que manejan estos subsistemas son:

- *Centrales*: repositorio de los datos referentes a las centrales nucleares existentes. Los datos que contiene son consultados, nunca modificados, por estos subsistemas.
- *Embalses*: contiene la información de los embalses que pueden verse afectados por vertidos. Este repositorio es consultado por aquellos subsistemas que tienen que mostrar información al usuario sobre el sistema hidrológico.
- *Isótopos*: contiene información sobre los isótopos que pueden estar presentes en un vertido nuclear. Este repositorio es empleado en modo sólo lectura por todos los subsistemas.
- *Ríos*: contiene información acerca de los ríos afectados por vertidos.
- *Vertidos*: este repositorio es el que contiene los valores de concentración-tiempo resultado de la ejecución de una simulación. Es el único almacén de datos que ve sus datos modificados por subsistemas como *Eliminar Simulación* o *Exportar Simulación*.

Ninguno de los anteriores subsistemas se subdividirá más puesto que tienen entidad propia, y son lo suficientemente específicos y manejables como para abordarlos de forma completa.

d) Subsistema Vertidos. Nivel 2

El subsistema de *Vertidos* se subdivide de la siguiente forma que se indica en la figura 5.2 y que se describe a continuación:

- *Adquisición Datos*: es el subsistema encargado de recoger los parámetros para los que se efectuará la simulación. Estos datos son por ejemplo, la

cantidad vertida, los isótopos presentes en el vertido, el caudal presente en el río, etc.

- *Procesar Sistema Hidrológico*: este subsistema es el encargado de efectuar la simulación a partir de los parámetros de entrada recogidos por el subsistema *Adquisición Datos*. Como resultado se obtendrán los valores de concentración-tiempo con los que después se construirán las curvas correspondientes.
- *Mostrar Progreso*: este subsistema es el encargado de mostrar el progreso de cálculos de la simulación de una forma gráfica e intuitiva para el usuario final.

De los tres subsistema que contiene el subsistema *Vertido*, sólo el subsistema *Procesar Sistema Hidrológico* será subdividido.

e) *Subsistema Procesar Sistema Hidrológico. Nivel 3*

El subsistema *Procesar Sistema Hidrológico* se subdivide en dos subsistemas: *Procesar Embalses* y *Procesar Ríos*, figura 5.2.

Cada uno de estos subsistemas es el encargado de procesar la simulación en tramos de tipo embalse y río, respectivamente. La parte del sistema hidrológico que se ve afectado por un vertido accidental está compuesto por una sucesión de tramos de tipo río y embalse. Para cada tramo de tipo río el subsistema *Procesar Ríos* efectuará los cálculos necesarios, actuando de la misma forma el subsistema *Procesar Embalses*.

Tanto uno como otro subsistema generan resultados de concentración de isótopos en el tiempo, que después servirán para generar las curvas concentración-tiempo de cada tramo del sistema hidrológico.

Puesto que los tramos de tipo río presentan características más o menos similares, el subsistema *Procesar Ríos* no se dividirá más. Tiene la entidad y tamaño suficiente como para abordarse de forma individual. Al contrario que el caso de los ríos, los embalses presentan diferencias más notables entre sí, diferencias que nos obligan a continuar con la subdivisión del subsistema, con el fin de obtener módulos más “manejables”.

f) *Subsistema Procesar Embalses. Nivel 4*

Para cada tipo de embalse, se dispone de un subsistema que es el encargado de procesar los datos para obtener los resultados de concentración-tiempo que después se mostrarán.

Cada uno de los subsistemas obtenidos se corresponde con un modelo dinámico de embalses:

- Modelo de Tiempo Muerto.
- Modelo de Tanques en Serie.
- Modelo de Tanque de Mezcla Completa.

- Modelo de Tanques en Serie con Realimentación.
- Modelo de Compartimentos Segmentados.
- Modelo de Compartimentos Segmentados con Recirculación.
- Modelo de Compartimentos Estratificados.

Cada uno de los subsistemas anteriores tiene la suficiente entidad y el tamaño necesario como para tratarlos de forma individual por lo que no se van a abordar más divisiones.

3. INFORMACIÓN ALMACENADA EN EL SISTEMA

La base de datos soporte de todos los datos generados por el sistema software es del tipo *Microsoft Access* en su versión 2000. La base de datos contiene toda la información que se requiere para la ejecución del código que ha sido obtenida en las tareas de Documentación y Modelización y la que debe introducir el usuario en tiempo real. La información almacenada y el modelo lógico de datos se muestran en la figura 5.3

Cada bloque del diagrama corresponde a una entidad del sistema y la información que contiene y que esta enumerada después del título del bloque, está instalada en el *software* de origen o es solicitada al usuario por el código al inicio de la ejecución. En los apartados siguientes se describen ambos tipo de información.

3.1. Información instalada en el *software* de origen

Todos los bloques de información, excepto el bloque de *vertido*, contienen información instalada en el *software* de origen. A continuación se realiza una breve descripción de la misma.

- *Central Nuclear.* Las centrales nucleares son las responsables del vertido de efluentes líquidos, por tanto es la propia central nuclear la que debe proporcionar la identificación de dicho vertido. Debido a ello se incluye en la base de datos, y se muestra por pantalla, el nombre de la central nuclear y su teléfono.
- *Isótopo.* La base de datos dispone de una amplia lista de isótopos y sus constantes de desintegración. Al inicio de la ejecución el usuario introduce el isótopo o isótopos vertidos y en la pantalla aparece el símbolo y la constante de desintegración de los isótopos señalados por el usuario.
- *Sistema Hidrológico.* La central nuclear para la que se desea realizar la ejecución se selecciona por pantalla, el código identifica el sistema hidrológico donde se ubica la central nuclear, muestra un mapa del sistema e indica su nombre.

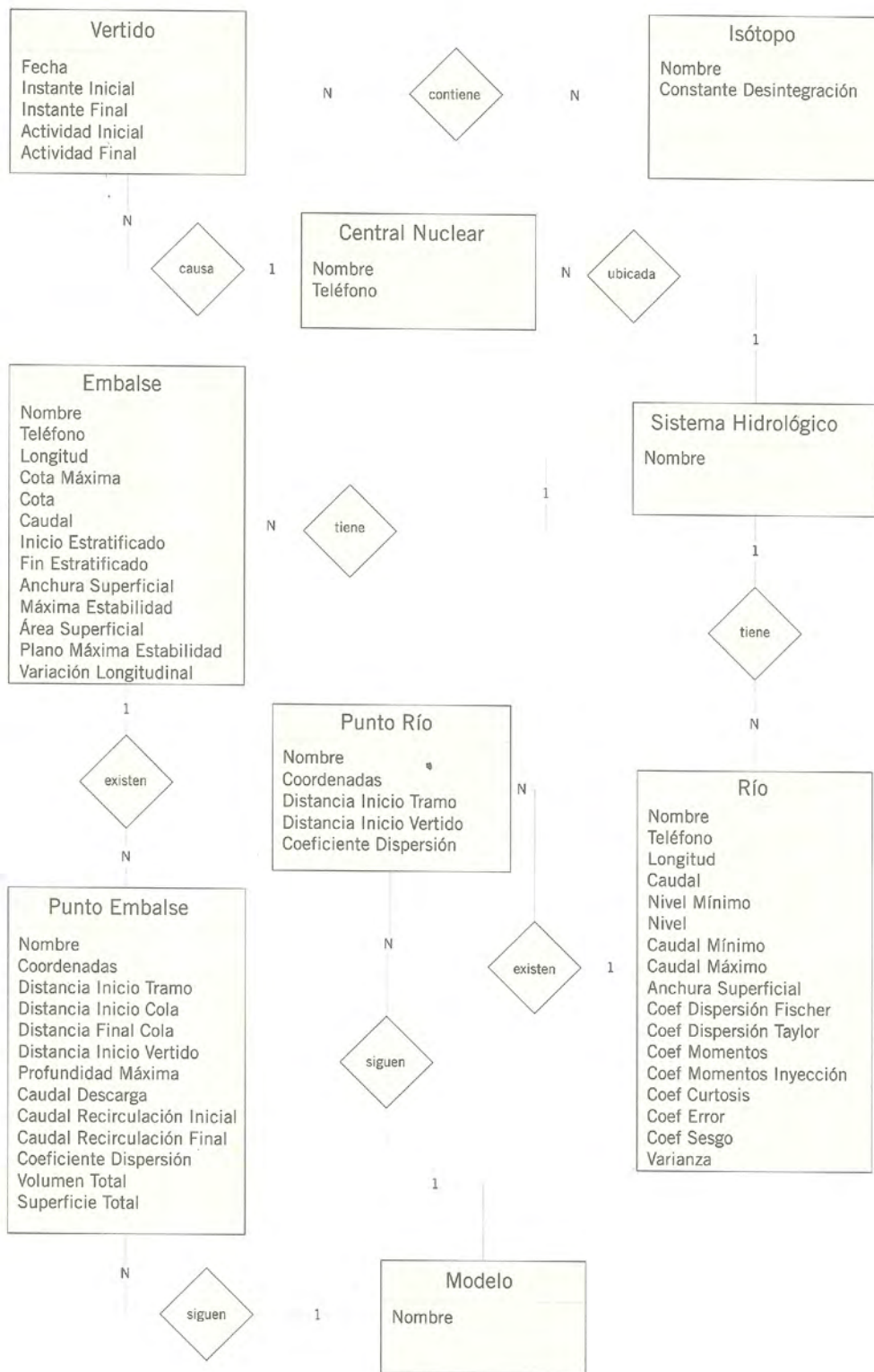


Figura 5.3. Información almacenada en el sistema

- *Embalse*. De la información requerida para la ejecución del programa en caso de que el sistema hidrológico contenga un embalse, solamente se requiere al usuario los datos de las actuales condiciones de flujo. Para facilitar la tarea al usuario, se muestra por pantalla el número de teléfono de la Confederación Hidrográfica en la que se encuadra el embalse considerado o el de la central hidroeléctrica que opera en el tramo o el de la propia central nuclear que ha realizado el vertido.
- *Río*. De la información requerida para la ejecución del programa en caso de que en el sistema hidrológico contenga un tramo de río, solamente se requiere al usuario los datos de las actuales condiciones de flujo. Para facilitar la tarea al usuario, se muestra por pantalla el número de teléfono de la Confederación Hidrográfica en la que se encuadra el río considerado o el de la central hidroeléctrica que opera en el tramo o el de la propia central nuclear que ha realizado el vertido.
- *Punto embalse*. Sitúa los puntos de interés en el embalse que fueron seleccionados en las tareas de Documentación y durante la realización de las Campañas de Campo. Toda la información requerida se encuentra instalada en el *software* de origen.
- *Punto río*. Sitúa los puntos de interés en el tramo del río que fueron seleccionados en las tareas de Documentación y durante la realización de las Campañas de Campo. Toda la información requerida se encuentra instalada en el *software* de origen.
- *Modelo*. Contiene el nombre del modelo que se recomienda para realizar la simulación.

3.2. Información requerida al usuario

Al hacer el diseño del sistema se ha pretendido que la información requerida al usuario fuera la menor posible. Así, esta información se reduce a información actual del vertido y de condiciones de flujo del sistema hidrológico. Los bloques que requieren esta información son los siguientes.

- *Vertido*. La información requerida al usuario define el vertido. Así la información requerida es la fecha en que se produce el vertido, tiempo de inicio y tiempo de terminación del vertido, si éste es en forma de onda, y actividad en ambos tiempos, y si el vertido es en forma de pulso, se requiere el tiempo y actividad inicial.
- *Embalse*. La información requerida al usuario define las condiciones de flujo en los tramos de río que contiene el sistema hidrológico. Así la información requerida son valores actuales de la cota de la superficie del agua en el embalse y del caudal de entrada.

- *Río*. La información requerida al usuario define las condiciones de flujo en los embalses que contiene el sistema hidrológico. Así, la información requerida son valores actuales de la altura lignimétrica en la estación de aforo existente en el tramo, o si no existe estación, se requiere el caudal que puede suministrarlo la central hidroeléctrica que opera en la zona.

4. INTERFAZ DE COMUNICACIÓN

Una vez abierto el código aparece una primera pantalla de presentación donde aparece el nombre del código y los organismos que han participado en su elaboración, figura 5.4. En la siguiente pantalla, en la barra de herramientas, se selecciona si se quiere realizar una nueva ejecución o si se quieren consultar antiguas ejecuciones almacenadas en la base de datos. En caso de que la opción sea la primera, aparece una pantalla con un mapa de España en la que se encuentran señaladas las ubicaciones de cada una de las centrales nucleares que han sido estudiadas figura 5.5. Sobre el mapa se selecciona la central nuclear para la que se quiere realizar la ejecución. A continuación aparecen cuatro pantallas. Dos pantallas para la adquisición de datos, una para el progreso de la simulación y una para mostrar los resultados.



Figura 5.4.
Pantalla de presentación



Figura 5.5.
Pantalla de selección de la central nuclear

4.1. Interfaces de adquisición de datos

La adquisición de datos se realiza mediante dos pantallas. En ambas pantallas en la parte inferior derecha aparecen dos botones que permiten pasar hacia la pantalla anterior, flecha hacia la izquierda, o la siguiente, flecha hacia la derecha.

Con la primera pantalla se introducen los datos del vertido y la información de las condiciones de flujo en el sistema hidrológico, figura 5.6. Se trata de una pantalla con tres pestañas que permite la selección del tipo de datos a introducir. Una está dedicada a introducir los datos del vertido, figura 5.6, y en la parte superior derecha aparece un mapa de la zona de influencia de la central nuclear. Otra de las pestañas está dedicada a la selección de isótopos y actividades vertidas, figura 5.7. Una última pestaña permite introducir la información de las condiciones actuales de flujo, figura 5.8.

Figura 5.6.
Pantalla de adquisición de datos del vertido

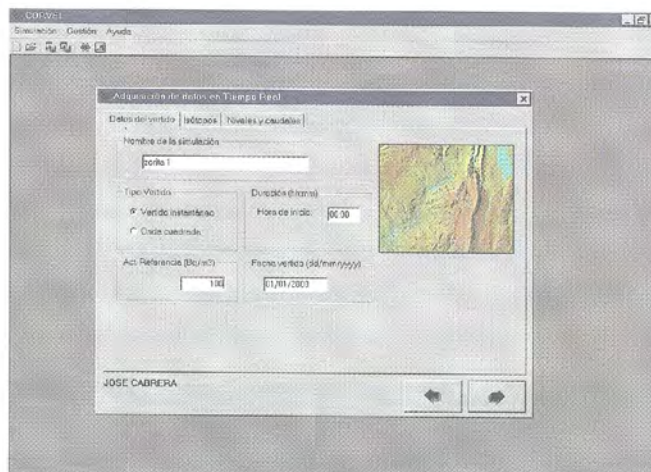
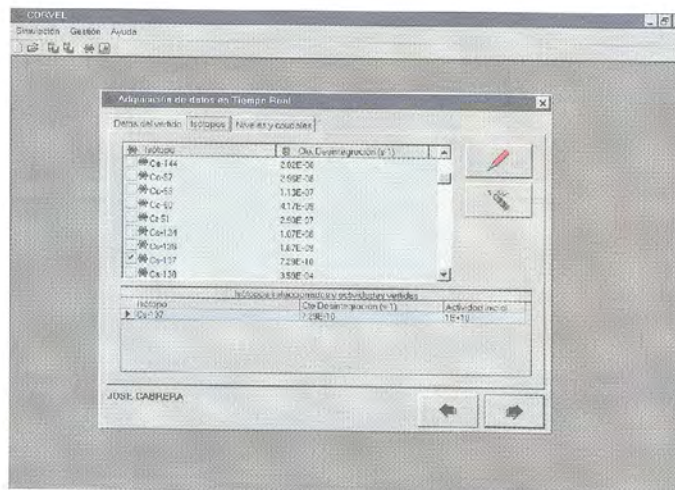


Figura 5.7.
Pantalla de adquisición de datos de isótopos



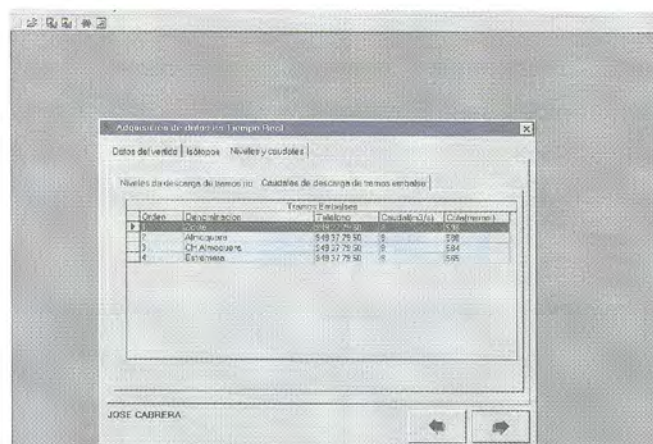


Figura 5.8.
Pantalla de adquisición de condiciones de flujo

La segunda pantalla se dedica a la selección de modelos en aquellos escenarios en que sea posible esta opción, figura 5.9. En esta pantalla, en la parte superior, aparece información del sistema para el que se realiza la ejecución: nombres de tramos, tipo de tramo (embalse o río), teléfono donde solicitar información y longitud del tramo. Pisando en el nombre de uno de los tramos en la mitad inferior aparecen los puntos de interés que delimitan a su vez subtramos dentro del tramo y los modelos recomendados por la caracterización realizada en el proyecto. Si se pisa sobre la flecha que aparece a la izquierda y siempre que el escenario lo permita, se pueden seleccionar otros modelos. En el caso de que se trate de un tramo de río, también se puede seleccionar el método de cálculo del coeficiente de dispersión.

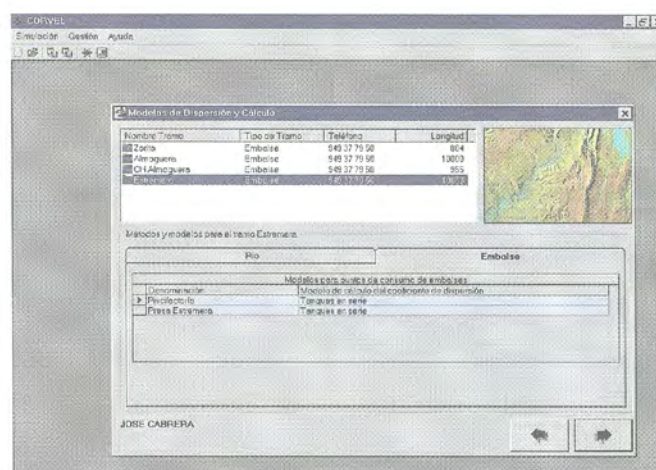


Figura 5.9.
Pantalla de selección de modelo

4.2. Interfaz de progreso de simulación

Una vez comenzada la ejecución, se nos muestra la pantalla de progreso de la simulación, figura 5.10. Esta pantalla presenta un mapa de la zona en el que se

encuentran indicados la situación de la central nuclear, de los tramos en que se divide la zona afectada y de los puntos de interés. A medida que avanza el cálculo, la imagen del sistema hidrológico se ilumina para dar una idea del progreso de la simulación. En la parte inferior aparecen los isótopos para los que se realiza la simulación y el tiempo calculado para el paso de la mancha de vertido y el tiempo real transcurrido desde el inicio de la simulación.

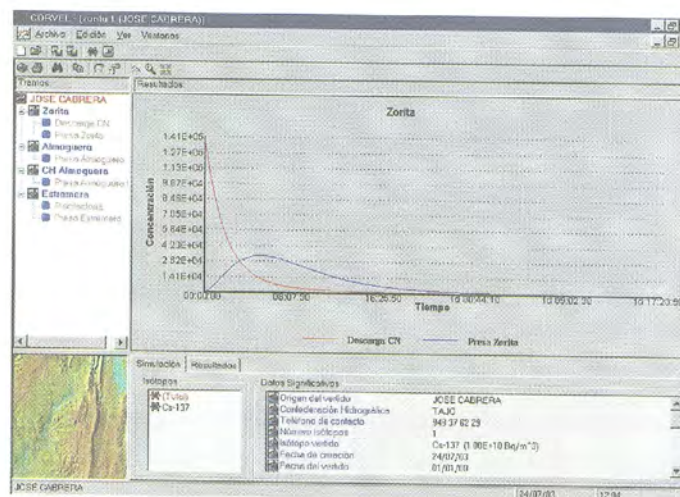
Figura 5.10.
Pantalla de progreso de la simulación



4.3. Interfaz de resultados

En la interfaz de resultados aparece en la parte superior izquierda un árbol con los tramos y puntos de interés de cada uno de ellos, figura 5.11. Si se señala el nombre de un tramo, en la gráfica de la derecha aparecen de forma conjunta las distribuciones de actividad de todos los puntos de interés del tramo. Si se señala el nombre de un punto de interés, en la gráfica de la derecha aparece la distribución del punto de interés señalado.

Figura 5.11.
Pantalla de resultados con información de isótopos



La parte inferior tiene dos pestañas. Si está activada la pestaña de simulación, un cuadro permite seleccionar si los resultados mostrados por pantalla, son de actividad total o la actividad es debida a uno de los isótopos contenidos en el vertido. En otro cuadro aparecen recogidos datos relevantes de la simulación. Si la pestaña activa es la de resultados, figura 5.12, se abre una tabla con los datos actividad-tiempo que se muestran en la gráfica.

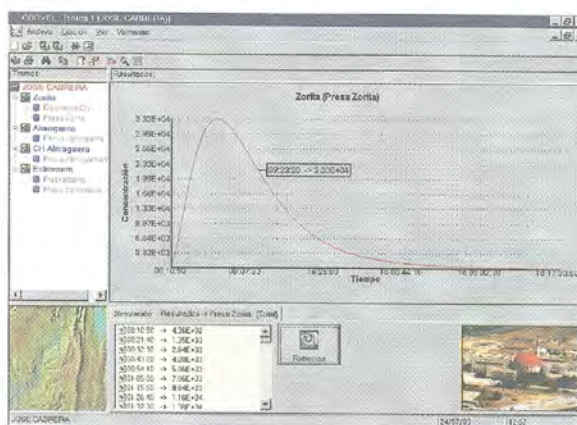


Figura 5.12. Pantalla de resultados con información numérica de actividad y tiempo

4.4. Barras de menú y herramientas

En todas las pantallas que aparecen durante la ejecución se muestra una barra de menú y una barra de herramientas que introducen diferentes utilidades del código. La utilidad y la forma de activación de cada una de ellas se encuentran recogidas en la Ayuda del código de forma clara y esquemática. Si se activa la Ayuda del código, aparece una pantalla con los elementos de la pantalla de inicio: Barra de menú, barra de herramientas y tapiz. Al activar cada una de ellas se define su utilidad y se abre una nueva pantalla con los centros activos donde se puede ir avanzando en las diferentes utilidades. Por ejemplo, la activación de la barra de menú abre la pantalla que se muestra en la figura 5.13. Si la activación es de la barra de herramientas la pantalla activada es la mostrada en la figura 5.14.

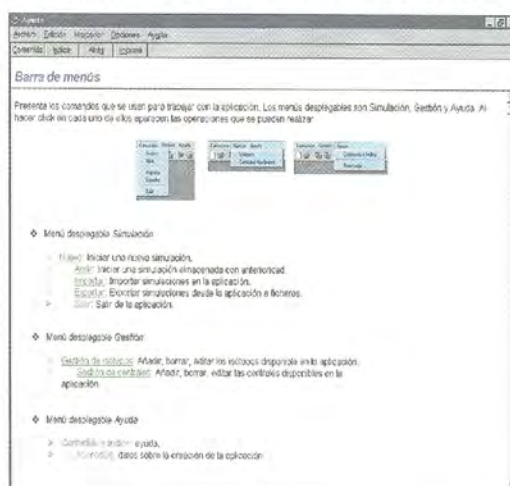


Figura 5.13. Pantalla de barra de menú

Figura 5.14.
Pantalla de barra de herramientas

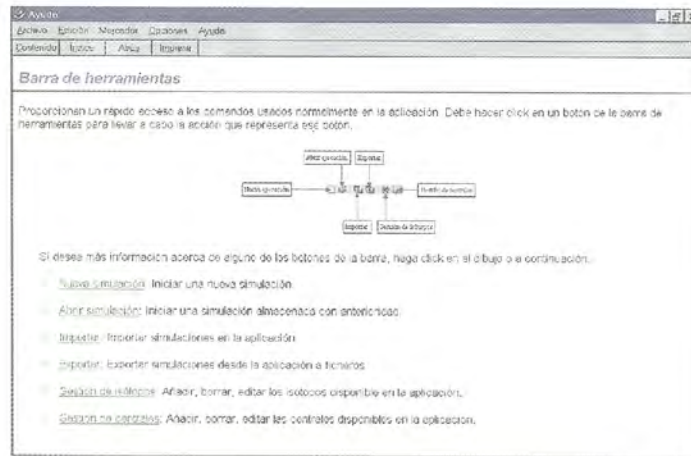
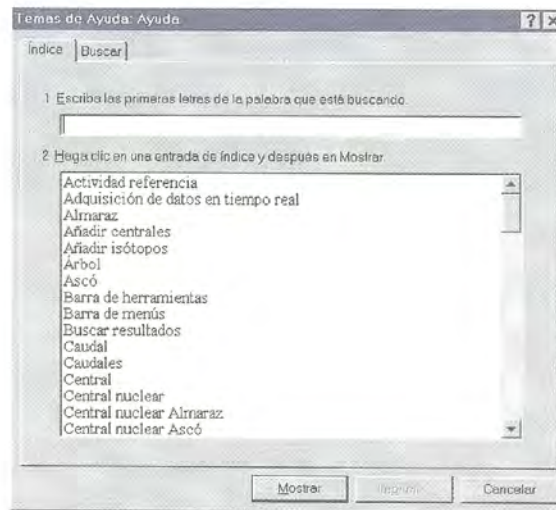


Figura 5.15.
Pantalla de índice



La Ayuda también permite buscar la información a través de un índice, figura 5.15. El índice contiene diferente información en cuanto a utilidades del código e información acerca de los sistemas hidrológicos. Por ejemplo, si se activa Central nuclear Santa María de Garoña se abre la pantalla que se muestra en la figura 5.16. En esta pantalla aparecen dos zonas activas, una de datos de la central nuclear y la segunda que da información sobre la zona de influencia de la central nuclear. La activación de la pantalla de “datos de la central nuclear” contiene un breve resumen de las características de la central nuclear, figura 5.17. La activación de la pantalla de “zona de influencia” da información sobre la longitud del tramo, poblaciones más cercanas al río o embalse, los tramos que se consideran en la zona de influencia e información sobre los mismos, figura 5.18.

Entre las utilidades que presenta el código cabe destacar la generación de informes. A través de la barra de herramientas de la pantalla de resultados se puede generar un informe. Este informe recoge información del escenario de la simulación, de la ejecución y la información más relevante de los resultados de la simulación, tabla 5.1.

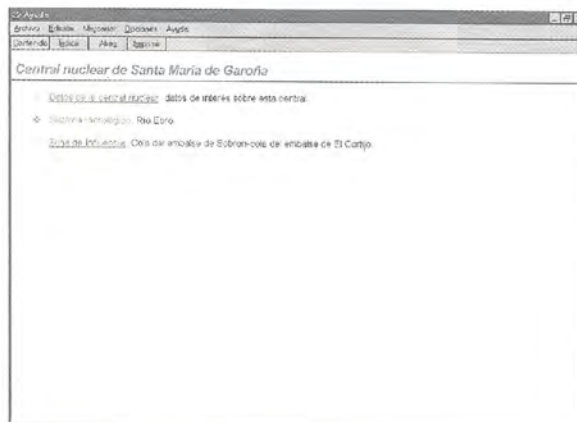


Figura 5.16.
Pantalla de información de la central nuclear

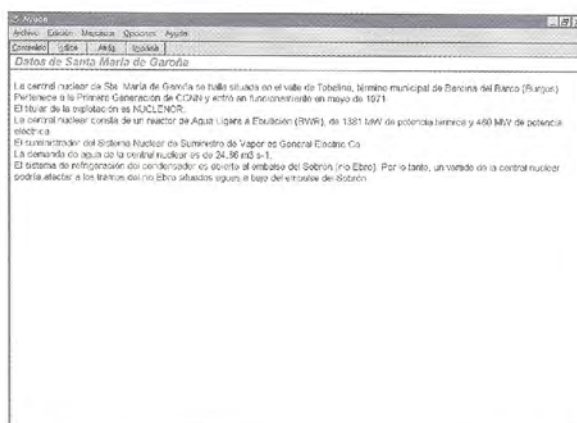


Figura 5.17.
Pantalla de datos de la central nuclear



Figura 5.18.
Pantalla de datos de zona de influencia de la central nuclear

Tabla 5.1.
Cálculo de concentraciones de radioisótopos contenidos en vertidos accidentales en aguas superficiales

Datos del sistema y vertido	José Cabrera
Origen del vertido	JOSÉ CABRERA
Nombre del Sistema Hidrológico	TAJO
Número de Tramos	4
Tramo (Número, Tipo, Nombre): ● Longitud (km): ● Número de Puntos de Consumo: ● Puntos de Consumo:	1 Embalse Zorita 0,88 2 Descarga central nuclear Presa Zorita
Tramo (Número, Tipo, Nombre): ● Longitud (km): ● Número de Puntos de Consumo: ● Puntos de Consumo:	2 Embalse Almoguera 10,00 1 Presa Almoguera central hidroeléctrica
Tramo (Número, Tipo, Nombre): ● Longitud (km): ● Número de Puntos de Consumo: ● Puntos de Consumo:	3 Embalse central hidroeléctrica Almoguera 0,96 1 Presa Almoguera central hidroeléctrica
Tramo (Número, Tipo, Nombre): ● Longitud (km): ● Número de Puntos de Consumo: ● Puntos de Consumo:	4 Embalse Estremera 10,08 2 Piscifactoría Presa Estremera
Parámetros de cálculo de simulación: ● Fecha de creación: ● Fecha del vertido: ● Duración de la simulación: ● Tipo de vertido: ● Actividad de Referencia: ● Isótopos y actividad vertida (Bq/m ³):	25/07/03 01/01/00 00:00:10 Instantáneo 100 Bq/m ³ Cs-137 (1.00E+10 Bq/m ³)
Parámetros de cálculo de simulación en tramo 'Zorita': ● Caudal del embalse: ● Cota del embalse: ● Parámetros de cálculo en punto 'Descarga central nuclear de 'Zorita': - Modelo Dinámico: ● Parámetros de cálculo en punto 'Presa Zorita' de 'Zorita': - Modelo Dinámico:	8 598 Compartimentos segmentados con recirculación Compartimentos segmentados
Parámetros de cálculo de simulación en tramo 'Almoguera': ● Caudal del embalse: ● Cota del embalse: ● Parámetros de cálculo en punto 'Presa Almoguera' de 'Almoguera': - Modelo Dinámico:	8 580 Tanques en serie

Datos del sistema y vertido	José Cabrera
Parámetros de cálculo de simulación en tramo 'central hidroeléctrica Almoguera': <ul style="list-style-type: none"> ● Caudal del embalse: ● Cota del embalse: ● Parámetros de cálculo en punto 'Presa Almoguera de 'central hidroeléctrica Almoguera': - Modelo Dinámico: 	8 584 Tiempo muerto
Parámetros de cálculo de simulación en tramo 'Estremera': <ul style="list-style-type: none"> ● Caudal del embalse: ● Cota del embalse: ● Parámetros de cálculo en punto 'Piscifactoría' de 'Estremera': - Modelo Dinámico: ● Parámetros de cálculo en punto 'Presa Estremera' de 'Estremera': - Modelo Dinámico: 	8 565 Tanques en serie Tanques en serie
Valores Máximos en tramo 'Zorita': <ul style="list-style-type: none"> ● Periodo de actividad en punto 'Descarga central nuclear': ● Máximo en punto 'Descarga central nuclear': ● Periodo de actividad en punto 'Presa Zorita': ● Máximo en punto 'Presa Zorita': 	00:00:00 -> 1d 11:34:10 00:00:00 -> 1.41E+05 00:10:50 -> 1d 17:31:40 05:03:20 -> 3.32E+04
Valores Máximos en tramo 'Almoguera': <ul style="list-style-type: none"> ● Periodo de actividad en punto 'Presa Almoguera': ● Máximo en punto 'Presa Almoguera': 	01:05:00 -> 9d 23:14:10 16:36:40 -> 5.62E+03
Valores Máximos en tramo 'central hidroeléctrica Almoguera': <ul style="list-style-type: none"> ● Periodo de actividad en punto 'Presa Almoguera central hidroeléctrica': ● Máximo en punto 'Presa Almoguera central hidroeléctrica': 	05:59:10 -> 10d 04:08:20 21:30:50 -> 5.62E+03
Valores Máximos en tramo 'Estremera': <ul style="list-style-type: none"> ● Periodo de actividad en punto 'Piscifactoría': ● Máximo en punto 'Piscifactoría': ● Periodo de actividad en punto 'Presa Estremera': ● Máximo en punto 'Presa Estremera': 	09:03:20 -> 10d 08:06:40 1d 11:25:00 -> 4.97E+03 1d 09:25:50 -> 11d 14:15:50 3d 02:14:10 -> 4.50E+03

Tabla 5.1.
(Continuación)
Cálculo de concentraciones de radioisótopos contenidos en vertidos accidentales en aguas superficiales

Conclusiones, beneficios de la investigación y recomendaciones

1. CONCLUSIONES

A lo largo del aparatado de Modelización se han presentado las conclusiones parciales de las actividades y resultados del proyecto. En este apartado se recogen aquellas conclusiones que son de carácter general.

1. El estudio realizado ha permitido adaptar y calibrar de una forma realística el código CORVEL para los sistemas hidrológicos susceptibles de ser afectados por vertidos de las centrales nucleares Santa María de Garoña, Ascó, Trillo, José Cabrera, Almaraz y Cofrentes.
2. La modelización de sistemas hidrológicos que contienen tramos con diferente comportamiento, tramos de río, de embalses y canales, es posible realizarla tratando cada uno de los tramos por separado e integrando el comportamiento global por alimentación de cada tramo con los datos de salida del tramo anterior.
3. La técnica de trazadores no radiactivos es adecuada para la caracterización del comportamiento dinámico de los ríos, ya que permite determinar su coeficiente de dispersión y es una técnica de nulo impacto ambiental.
4. En términos generales, el método de Cambio de Momentos es el más adecuado para la determinación del coeficiente de dispersión. La utilización de correlaciones en el cálculo del coeficiente de dispersión debe hacerse con sumo cuidado y cuando no se disponga de información suficiente para utilizar otros métodos.
5. La selección del modelo de predicción de la evolución de la actividad en un río se puede realizar mediante la comparativa de los estadísticos de las distribuciones de trazador.
6. En términos generales, el modelo desarrollado por Chatwin es el más adecuado para la predicción de la evolución de la actividad en un río. Cuando el vertido es en forma diferente a un pulso, el único modelo aplicable en la predicción es el modelo de Levenspiel, Tanques en Serie.
7. La medida de perfiles verticales de temperatura y conductividad eléctrica del agua en diferentes secciones transversales de un embalse es adecuada para determinar su dinámica. Mediante estas medidas se puede determinar el estado de estratificación, homogeneidad en las tres direcciones del espacio y tiempo de viaje de vertidos.
8. La caracterización longitudinal del embalse es imprescindible para su modelización. La hipótesis de homogeneidad longitudinal no es aplicable en la mayoría de los embalses.
9. En los embalses en los que se encuentran instaladas centrales hidroeléctricas o centrales nucleares, el estado del embalse y su dinámica

dependen en gran medida de la operación de dichas centrales. Debido a ello, la generalización de los resultados de campañas de campo puntuales debe realizarse con sumo cuidado.

10. La modelización de la evolución de un vertido en un embalse puede realizarse mediante los modelos de Tanques en Serie y de Tiempo Muerto, con las modificaciones específicas requeridas para cada embalse y época del ciclo anual.
11. Para la modelización se requiere la cubicación del embalse, disponer de las curvas de capacidad y superficie de la lámina de agua del embalse y disponer de información de los caudales de los principales aportes y detracciones de agua del embalse.

2. BENEFICIOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los beneficios obtenidos en la presente investigación se pueden englobar en cuatro tipos de actividades: caracterización de sistemas hidrológicos, desarrollo de códigos, documentación y publicaciones científicas generadas y presentaciones realizadas y formación.

2.1. Caracterización de sistemas hidrológicos

Las tareas de Documentación y Campañas de Campo realizadas dentro del proyecto Tracer han permitido realizar una caracterización completa de los sistemas hidrológicos de aguas continentales que pueden verse afectados por la operación de las centrales nucleares españolas. Esta caracterización puede ser de gran ayuda en el seguimiento que realiza el CSN a las centrales nucleares y en la toma de decisiones de protección radiológica. La información más relevante desde estos puntos de vista se puede resumir en los puntos siguientes.

- Se ha elaborado una relación de poblaciones cercanas al sistema hidrológico. En esta relación se incluye: comunidad autónoma y provincia de las que depende administrativamente, número de habitantes y distancia al sistema hidrológico.
- Se ha elaborado una relación de los embalses y azudes construidos en los sistemas hidrológicos que incluye: municipio y provincia en la que se encuentra construida la presa, coordenadas UTM de la presa, compañía explotadora, superficie de cuenca, aportes, cotas máxima y mínima de la superficie del agua y volumen total de agua embalsada.
- Se han identificado los puntos de consumo indicando su uso.
- Se han identificado zonas de protección medioambiental.

- Se han determinado caudales máximos y mínimos de circulación de agua y del espesor de la lámina de agua en cada uno de los tramos de sistemas hidrológicos estudiados.
- Se ha determinado como afecta la operación de las centrales hidroeléctricas de la zona a la dinámica de los sistemas hidrológicos.
- Se han determinado vías preferentes de circulación en algunas zonas de ríos.
- Se ha determinado como afecta la operación de las centrales nucleares a las propiedades del agua, temperatura y conductividad eléctrica, contenida en embalses.
- Se ha delimitado la zona de influencia de las centrales nucleares aguas arriba y aguas abajo del avenamiento de su canal de descarga.
- Se ha determinado el volumen útil para la dilución de los efluentes de las centrales nucleares.

2.2. Desarrollo de códigos

Dentro del marco del proyecto Tracer se han desarrollado varios códigos de uso interno con diferentes aplicaciones y el código CORVEL, que era el objetivo principal del proyecto.

Los códigos de uso interno se han utilizado en la elaboración de los resultados experimentales y básicamente calculan parámetros de la estructura de la lámina de agua en embalses y parámetros y estadísticos de las curvas de trazador y de simulaciones de las curvas de trazador con diferentes coeficientes de difusión y modelos de simulación.

El principal resultado de la investigación es el código CORVEL. Dentro del marco del proyecto Tracer II se ha rediseñado el antiguo código CORVEL. En su nueva versión escrita en lenguaje VISUAL BASIC, se han implementado en el código las caracterizaciones completas de todos los sistemas hidrológicos de aguas continentales que pueden verse afectados por la operación de las centrales nucleares españolas y se han implementadas nuevas herramientas informáticas que agilizan la adquisición de datos en tiempo real, la ejecución del código y la salida de resultados. Así mismo, se han implementado una serie de utilidades que facilitan el análisis y manejo de los resultados de la ejecución actual y otras realizadas con anterioridad.

El actual código CORVEL puede realizar predicciones de evolución de vertidos en tiempo real y predicciones de simulaciones de vertidos potenciales. En el primer caso el código se ejecuta con los datos recomendados por los resultados de caracterización y modelización del sistema. En el segundo, el usuario puede seleccionar parámetros y modelos para la simulación, en aquellos escenarios que lo permitan. Esta dualidad de forma de operación le proporciona al código una doble utilidad. Por una parte puede ser utilizado en caso de emergencia para la toma de

decisiones y por otra puede servir como una herramienta de entrenamiento y para la simulación de estrategias de actuación ante potenciales situaciones de accidente.

El hecho de que el código se encuentre calibrado le da un interés especial con vistas a su incorporación, de forma total o parcial al sistema RODOS. El sistema RODOS, impulsado por la UE, exige la incorporación de códigos calibrados y convalidados con datos reales de los sistemas hidrológicos que se incluyen. Ambas características las cumple el código CORVEL.

2.3. Documentación, publicaciones científicas y presentaciones realizadas

Durante los cuatro años y medio que ha tenido de duración el proyecto Tracer II se han realizado las siguientes actividades en este apartado.

- Informes:
 - 18 Informes Técnicos de Progreso.
 - 2 Informes Finales.
- Publicaciones Científicas:
 - M. C. Palancar, J. M: Aragón y F. Sánchez, Proyecto TRACER: Calibración en ríos y embalses del código CORVEL, para el cálculo de concentraciones en tiempo real de radioisótopos contenidos en vertidos líquidos accidentales, en aguas superficiales, 2002, IV Jornada sobre Resultados del Plan de Investigación del CSN. CSN “Colección Otros Documentos”, Madrid, ISBN: 84-95341-15-8.
 - F. Sánchez, R. Gil, M.C. Palancar y J. M: Aragón, Proyecto TRACER: Aplicación del código CORVEL en ríos y embalses, 2000, Seguridad Nuclear, 16.
 - J. M: Aragón, M.C. Palancar, F. Sánchez y R. Gil. 2003, Influence of the river dead zones in pollutants dispersion, Proceeding del IV Chemical Industry and Environmental Congress, 393, Editor, Á. Macías y J. Umbría. ISBN84-89528-61-6.
 - M. C. Palancar, J. M: Aragón, F. Sánchez and R. Gil, 2003, About the determination of longitudinal dispersion coefficients in rivers, Water Environment Research, abril, 14.
 - M. C. Palancar, J. M. Aragón, H. López y R. Gil, Memoria Técnica del Proyecto TRACER. A publicar por la Editorial del CSN.
 - U. Wise, M. C. Palancar, J. M: Aragón, F. Sánchez and R. Gil, Modeling the Entrepeñas Reservoir, sometido a Water Environment Research.
- Comunicaciones a Congresos.
 - 2nd European Meeting on Chemical Industry and Environment (EMCHIE'96). Tarragona, 1996. Evaluation of longitudinal disper-

- sion coefficients in rivers from velocity profiles. F. Sánchez, M.C. Palancar, J. M. Aragón, A. Plata, R. Greciano y R. Gil.
- 13th International Congress of Chemical and Process Engineering (CHISA98). Praga (Czech Republic) 25-30 Aug. 1998. Modelling the dynamic of reservoir. F. Sánchez, M.C. Palancar, J. Alegría y J. M. Aragón.
 - 15th International Congress of Chemical and Process Engineering (CHISA2002). Praga (Czech Republic) 25-29 Aug. 2002. Analysis of the influence of the inflows in the active volume of reservoirs for the pollutant dispersion" M. C. Palancar, J. M. Aragón, F. Sánchez and R. Gil.
 - IV Chemical Industry and Environmental Congress, Las Palmas de Gran Canaria 2003, Influence of the river dead zones in pollutants dispersion, J. M: Aragón, M.C. Palancar, F. Sánchez y R. Gil.

2.4. Formación

Los resultados de formación se encuadran dentro del carácter docente que tiene la universidad, organismo donde se ha llevado a cabo el trabajo. El trabajo de investigación realizado se ha plasmado en los siguientes hitos.

- Tesis de Licenciatura en CC Químicas de D. Fernando Sánchez Paredes.
- Tesis Doctoral de D. Fernando Sánchez. Licenciado en CC Químicas. Universidad Complutense de Madrid, 2000.
- Diploma de Estudios Avanzados (DEA) de D^a Haday López Portillo. Licenciada en CC Medioambientales.
- Tesis Doctoral de D^a Haday López Portillo. Licenciada en CC Medioambientales. La Tesis se encuentra en la etapa de redacción y se defenderá en el próximo Curso Académico, ya que por la Programación del Curso de Doctorado no es posible realizar la defensa de la Tesis el mismo curso de la obtención del DEA.
- Proyecto Fin de Carrera de D. Francisco Javier Valverde Moros. Alumno de 5^o curso de la licenciatura en Informática de la Universidad Politécnica de Madrid. Se defenderá en el mes de octubre del presente año.
- Proyecto de Investigación de D^a Carolina Sánchez.
- Proyecto de Investigación de D. Israel Amores Bautista.
- Proyecto de Investigación de D^a Raquel Fernández Casatejada.
- Proyecto de Investigación de D^a María Medina García.
- Proyecto de Investigación de D^a Marta Barrio Gallego.
- Proyecto de Investigación de D^a M^a del Mar Nafría Mindi. Alumna de 5^o curso de la Titulación de Ingeniero Químico.
- Proyecto de Investigación de D^a Paloma López Rojo Alumna de 5^o curso de la Titulación de Ingeniero Químico.

- Proyecto de Investigación de D^a M. García García. Alumna de 5^o curso de la Titulación de Ingeniero Químico. Se defenderá en el mes de septiembre del presente año.
- Proyecto de Investigación de D^a M^a Márquez López. Alumna de 5^o curso de la Titulación de Ingeniero Químico. Se defenderá en el próximo curso académico.
- Introducción a la Investigación (asignatura de 5^o curso de la titulación de Ingeniero Químico). Dentro del marco del proyecto TRACER II, han cursado esta asignatura 20 alumnos.

3. RECOMENDACIONES

Los resultados y conclusiones obtenidas en el estudio realizado dentro del proyecto Tracer permiten establecer dos recomendaciones.

- La modelización de los sistemas hidrológicos se ha realizado para especies solubles en agua. Sin embargo, los vertidos de una central nuclear pueden contener especies que no son solubles en el medio hídrico y por lo tanto para la modelización de dichos vertidos sería imprescindible abordar el estudio experimental de los procesos de sedimentación.
- La modelización realizada para los embalses es unidimensional. Los resultados experimentales muestran que en muchos casos, aunque el embalse se encuentre en régimen de mezcla, ésta no es completa, por lo que sería aconsejable abordar la modelización bidimensional de estos sistemas.

Referencias bibliográficas

- Åberg, B., Rodhe, W., 1952, *Über die milieufaktoren in einigen südsch wedischen seen*, Symbol. Bot. Upsalien., Vol. 5, N° 3.
- Bannister, T.T., 1974, *Production equations in terms of chlorophyll concentration, quantum yield and upper limit to production*, Limnol. Oceanogr., Vol. 19, N° 1, pág. 1 - 12.
- Brutsaert, W., 1975, *On the deriverable formule for long-wave radiation from clear skies*, water Resour. Res., Vol. 11, pág. 742-744.
- Brutsaert, W., 1982, *Evaporation into the atmosphere*, Reidel, Dordrecht.
- Chatwin, P.C., 1980, *Presentation of longitudinal dispersión data*, J. Hydraul. Div., ASCE, Vol. 93, N° HY1, pág. 71 - 83.
- Chen, C.T., Millero, F.J., 1977, *The use and misuse of pure water PVT properties for lakes waters*, Nature, Vol. 266, pág. 70 - 71.
- Christensen, B.A., 1977, discussion of *Predicting dispersión coefficients of streams* by Liu, H., J. Hydraul. Div., ASCE, Vol. 105, N° EE6, pág. 1144- 1146.
- Colman, J.A., Armstrong, D.E., 1987, *Vertical eddy diffusivity determined with Radon-222 in the bentic boundary layer of ice covered lakes*, Limnol. Oceanogr., Vol. 32.
- Csanady, G.T., 1963, *Turbulent diffusion in lake Huron*, J. Fluid. Mech., Vol. 17, pág. 360 - 384.
- Dake, J.M.K., Harleman, D.R.F., 1969, *Thermal stratification in lakes: analytical and laboratory studies*, Water Resour. Res., Vol. 5, N° 2, pág. 484 - 495.
- Denman, K.L., Miyake, M., 1973, *Upper layer mofication at Ocean Station Papa: observations and simulations*, J. Phys. Oceanogr., Vol. 3, pág. 185- 196.
- Denton, R.A., 1990, *Analytical asymptotic solutions for longitudinal dispersión with dead zones*, J. Fluid. Mech, Vol. 28, pág. 293 - 303.
- Elder, J.W., 1959, *The dispersión of marked fluid in turbulent shear flow*, J. Fluid. Mech., Vol. 5, N° 4, pág. 544 - 560.
- European Comision, 1995, *Methodology for Assenssing the Radiological Consequences of Routine Releases of Radionuclides to the Environment*, EUR 15760.
- Fischer, H.B., 1967, *The mechanics of dispersión in natural streams*, J. Hydraul. Div., ASCE, Vol 93, N° HY6, pág. 187 - 216.
- Fischer, H.B., 1975, Discussion of *Simple method for predicting dispersión in streams* by McQuivey, R.S. y Keefer, T. N., J. Environ. Eng. Div., ASCE, Vol 101, N° EE3, Proc. Paper 11337, pág. 435 - 455.
- Fischer, H.B., 1979, *Mixing in inland and coastal waters*, Academic Press Inc., San Diego.
- Ford, D.E., Stefan, H.G., 1980, *Thermal predictions using integral energy models*. J. Hydraul. Div., ASCE, Vol 106, N° HY1, pág. 39 - 55.

- Ford, D.E., Johnson, L.S., 1986, *Assesment of reservoir mixing processes*, Tech. Report E-86-7, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, CE, Vicksburg, MS.
- Friehe, C.A., Schmidt, K.F., 1976, *Parameterization of air-sea interface fluxes of sensible heat and moisture by aerodynamic formulas*, J. Phys. Oceanogr., Vol 6, pág. 801 - 809.
- Garret, A.E. 1984, *Local isotropy and the decay of turbulence in a stratified fluid*, J. Fluid. Mech, Vol. 144, pág. 231 - 280.
- Gregg, M.C., 1987, *Diapicnal mixing in the thermocline: a review*, J. Geophys. Res., Vol. 93, pág. 12381 - 12392.
- Hetrick, D.M. 1992, *RIVER -RAD-A computer code for simulating the transport of radionuclides in rivers*. ORNL/TM-12169
- Hicks, B.B., 1972, *Some evaluations of drag and bulk transfer coefficients over water bodies of different sizes*, Boundary -Layer Meteorol., Vol 3, pág. 201 - 213.
- Hondzo, M., Stefan, H.G., 1993, *Lake water temperature simulation model*, J. Hydraul. Eng., ASCE, Vol 119, N° 11, pág. 1251 - 1273.
- Hull, D.E., 1962, *Disperion and persistence of tracer in river flow measurements*, Int. J. Appl. Rad. and Isot., pág. 63 - 73.
- Hutchinson, G.E., Löffler, H., 1956, *Thermal classification of lakes*, Proc. Nat. Acad. Sci., Vol. 42, pág. 84 - 86.
- Hutchinson, G.E., 1957, *A treatise on limnology*, Vol. I: Geography, Physics and Chemistry, Wiley and Sons, New York, N.Y.
- I.A.E.A., 1985, *Hydrological dispersión of radioactive material in relation to nuclear power plant siting*, Safety Series N° 50-SG-S6.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., 1969, *Thermal radiation from the atmosphere*, J. Geophys. Res., Vol. 74, N° 23, pág. 5397 - 5403.
- Imberger, J., Patterson, J.C., 1981, *A dynamic reservoir simulation model DYSRESM-5 in Transport models for inland and coastal waters*, Academic Press Inc., N.Y.
- Ivey, central nuclear, Imberger, J., 1991, *On the nature of turbulence in a stratified fluid, Part I: The energetics of mixing*, J. Phys. Oceanogr., Vol 21, pág. 650 - 659.
- Kullenberg, G., 1973, *An experimental study of diffusion characteristics in the thermocline and hypolimniom regious of Lake Ontario*, Proc. 16th Conf. Great Lakes Res. pág. 774-790.
- Lerman A. Imbodem, D.M. and Gat, J.R. 1995, *Physics and chemistry of lakes*, Springer-Verlag, Berlín.
- Levenspiel, O., 1958, Ind. Eng. Chem., Vol. 50, N° 343.
- Liu, H., 1977, *Predicting dispersion coefficients of stream*, J. Hydraul. Div., ASCE, Vol. 103, N° EEI, pág. 56-59.

- Liu, H., Cheng, H.D., 1980, *Modified Fickian model for predicting dispersión*, J. Hydraul. Div., ASCE, Vol 106, N° HY6, pág. 1021 - 1040.
- Mc Quivey, R.S. and Keefer, T.N., 1974, *Simple method for predicting dispersion in streams*, J. Environ. Eng. Div., ASCE, Vol. 100, Proc. Paper 10708, pág. 997-1011.
- Norton, W.R., 1968, *Mathematical models for the prediction of thermal energy changes in impoundments*, Environmental Protection Agency by Water Resources Engineers, Inc., Walnut creek, California, Water Pollut. Control Ser., 16130, EXT 1216.
- NRC^a, 1977, Regulatory Guide 1109
- NRC^b, 1977, Regulatory Guide 1113
- Oakey, N.S., Elliot, J.A., 1982, *Dissipation within the surface mixed layer*, J. Phys. Oceanogr., Vol. 12, pág. 171 - 185.
- Osborn, T.R., 1980, *Estimates of the local rate of vertical diffusion from dissipation measurements*, J. Phys. Oceanogr, Vol. 10, pág. 83 - 89.
- Osgood, R.A., 1984, *A 1984 study od the water quality of 43 metropolitan area lakes*, Publication N° 10-84-172, Metropolitan Council, St. Paul, Minn., Vol. 40.
- Ozmidov, R.V., 1965, *On the turbulent exchange in a stably stratified ocean*, Atmos. Oceanic. Phys. Ser., Vol. 1, pág. 853 - 860.
- Palancar, M.C., Sánchez, F. y Aragón, J.M., 2001, Proyecto Tracer, SN-Colección Otros Documentos, 21, ed. CSN, ISBN 84-95341-15-8.
- Powell, T., Jassby, A., 1974, *The estimation of vertical eddy diffusivities below thermocline in lakes*, Water Resour. Res., Vol. 10, pág. 191 - 198.
- Raskob, W. y Ehrhardt, J., 2002, *The RODOS System: Decisión Support for Nuclear Off-Site Emergency Management in Europe*, RODOS (GEN)- TN(99)02.
- Rimmar, G.M., 1960, *Trudy Gorno-Geologicheskogo Instituta*, fascicule 36.
- Sánchez, F., Palancar, M.C., Alegría, J. and Aragón, J.M., 1996, *Evaluation of longitudinal dispersion coefficients in rivers from velocity profiles*, 2nd European Meeting on Chemical Industry and Enviroment, EMCHIE.96, Alghero, Italy.
- Sánchez, F. Aragón, J.M., Palancar, M.C. Y Alegría, J., 1998, *Corvel: A code for real eveluation and predicción of the activity in rivers and reservoir after a liquid release from nuclear facilities*, WM' 98, HLW, LLW, Mixed Wastes and Environmental Restoration-Working Towards a Cleaner Environment, Tucson, Arizona, 1-5 marzo.
- Sanchez, F., Gil, R. Palancar, M.C. y Aragón, J.M., 2000. El proyecto Tracer: aplicación del código Corvel en ríos y embalses. Seguridad Nuclear, 16, 17.
- Sayre, W.W., Chang, F.M., 1968, *A laboratory investigation of the open channel dispersión process for dissolved, suspended and floating dispersants*, U.S. Geological Survey Professional Paper 433-E.

- Schaeffer, R., 1975, *Conséquences du Desplacment des Sedimentes sur la dispersión des Radionucéides. Proceeding of the Conference on Impacts of Nuclear Releases into the Aquatic Environment*, Ontaniemi. Italia.
- Stefan, H., Demetracopoulos, A.C., 1981, *Cells-in-series simulation of riverine transport*, J. Hidraul. Div., ASCE., Vol. 107, N° HY6, pág. 675 - 697.
- Swinbank, W.C., 1963, *Long-wave radiation from clear skies*, Q.J.R. Meteorol. Soc., Vol. 89, pág. 339 - 348.
- Taylor, G.I., 1953, *The dispersión of soluble matter in solvent flowing slowly through a pipe*, Proc. R. Soc. London Ser. A, Vol. 219, pág 186 - 203.
- Taylor, G.I., 1954, *The dispersión of matter in turbulent flow through a pipe*, Proc. R. Soc. London Ser. A, Vol. 223, pág. 446 - 468.
- Thackston, E.L., Krenkel, P.A., 1967, *Longitudinal mixing in natural streams*, J. Sanit. Eng. Div., ASCE, Vol. 93, N° SA5, pág. 67 - 90.
- T.V.A., 1972, *Heat and mass transfer between a water surface and the atmosphere*, Tennessee Valley Authority, Rep. N° 0-6803.
- Thorpe, S.A., 1977. *Turbulence and mixing in a Scottish loch.*, Philos. Trans. R. Soc. London, A286, pág. 125 - 181.
- US Regulatory Commission, 1977, *Estimating aquatic dispersión effluents from accidental and routine reactor releases for the purpose of implementing, Regulatory Guide.*
- Wetzel. R.G., 1975, *Limnología*, Ed. Omega, S.A., Barcelona.
- White, J. E: y Eckerman, K. F., 1983, *User's Manual for LPGS: A Computer Program for Calculing Radiation Exposure Resulting from Accidental Radioactive Releases to the Hydrosphere.* Nureg/CR-2974, ORNL/TDMC-2.
- Yotsukura, N., Cobb, E.D., 1972, *Transverse diffusion of solutes in natural streams*, U.S. Geological Survey, Professional Paper 582-C.

