



Universitat de Lleida

RELACIONES CLIMA-AGUA-SUELO-SUBSUELO EN MONEGROS II

BERGA CELMA, ANA M.

ADVERTIMENT. La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX (www.tesisenxarxa.net) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

ADVERTENCIA. La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR (www.tesisenred.net) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

WARNING. On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX (www.tesisenxarxa.net) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author.

UNIVERSIDAD DE LERIDA
ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRONOMOS

BERGA CELMA, ANA M.
Medi Amb. i C.Sòl
26/01/94
93/94 1

RELACIONES CLIMA-AGUA-SUELO-SUBSUELO
EN MONEGROS II

TESIS DOCTORAL
ANA BERGA CELMA

Lérida, Octubre de 1993

5. HIDROLOGIA SUPERFICIAL

5. HIDROLOGIA SUPERFICIAL

5.1. INTRODUCCION

Este capítulo se ha subdividido en cuatro apartados que comprenden (1) las cuencas hidrológicas, (2) el barranco de Valcuerna, (3) las áreas endorreicas y (4) el río Ebro.

Cuencas hidrológicas

La caracterización hidrológica del área de estudio ha tenido como primer paso una división del área en unidades hidrológicas independientes. De cada una de ellas se ha realizado una breve descripción del medio físico y de los principales aspectos que la caracterizan: relieve, suelo, geología y cubierta vegetal. Utilizando los datos que se presentan en el capítulo 2 (Clima) se han estimado, por otro lado, las aportaciones anuales de cada cuenca.

Barranco de Valcuerna

La unidad hidrológica superficial de mayor extensión e importancia en el área de estudio es el Barranco de Valcuerna. En su cabecera se sitúa la boca sur del túnel de Alcubierre, que constituye el inicio de la red de distribución de agua de la futura zona regable Monegros II. Dicho túnel conecta las partes primera y segunda del canal de Monegros y es el punto de partida de los canales de Sástago (actualmente en construcción) y de la continuación del de Monegros.

Ambos canales forman parte del Plan General de Transformación de la Segunda Parte del Canal de Monegros aprobado por Decreto 1.976/1986 y declarado de interés nacional por Real Decreto 37/1985.

Los primeros sectores que prevé regar el Plan General están situados en las márgenes del Barranco de Valcuerna. El 23 de Abril de 1987 se inauguró la salida de agua de la boca sur del túnel de Alcubierre, aunque desde el 10 de Marzo ya se utilizaba el cauce del barranco como sistema en precario de distribución del agua. En Junio de 1987 se regaban 500 ha del sector I, localizado en la margen izquierda del Barranco de Valcuerna. En la actualidad, más de 1.200 ha se han transformado en riego por aspersión (principalmente pivotes y máquinas laterales), tanto en el Barranco de Valcuerna como en las vales adyacentes (Figura 47), siendo la cebada y el girasol los cultivos más extendidos.

El interés del estudio del Barranco de Valcuerna es doble. Por un lado, al tratarse del único curso de agua permanente, debe constituir el principal nivel de base de las aguas superficiales y subterráneas del área. En esta cuenca podría efectuarse un balance hidrosalino que permitiera estimar la contribución relativa de agua y sales de cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. Sin embargo, la realización de dicho balance en el estado actual de desarrollo cambiante y dinámico del sistema es muy complejo, debido a la imposibilidad de aplicar modelos de régimen estacionario. En segundo lugar, puede efectuarse el seguimiento de la evolución de la salinidad de las aguas y suelos en el

proceso de transformación de secano a regadío, y determinar los efectos a corto y largo plazo de dicha transformación sobre estas variables.

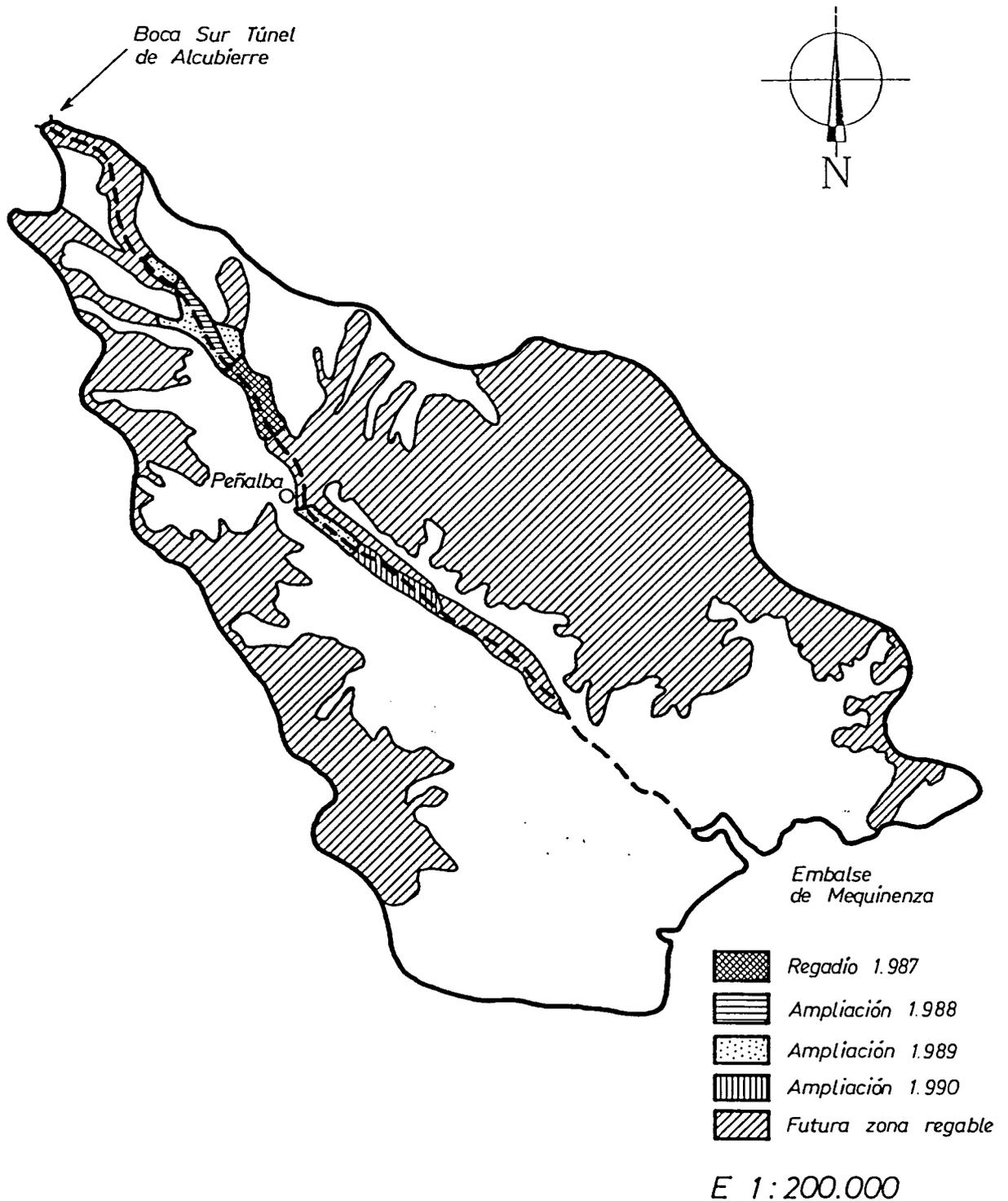


Figura 47. Localización y extensión de la superficie regable futura y de la superficie regada durante los años 87-90 en el Barranco de Valcuerna.

Los objetivos del estudio del Barranco de Valcuerna son los siguientes: (1) estimación del volumen de agua, salinidad y masa total de sales exportadas por el barranco en condiciones naturales previas al riego y análisis de su evolución durante la puesta en regadío, (2) localización de fuentes puntuales y difusas de descarga de agua al barranco y análisis de su salinidad y composición iónica y (3) balance de masas de agua y sales para la estimación del volumen y salinidad de las aguas de aporte subterráneo al barranco.

Áreas endorreicas

La cuenca hidrológica que ocupa el centro del área de estudio no dispone de un drenaje superficial definido, lo que, asociado a otras causas, ha originado la existencia de numerosas cubetas endorreicas que contienen agua de manera más o menos temporal.

El área de estudio constituye, en efecto, uno de los focos más importantes del endorreísmo aragonés. Su importancia radica en el gran número de depresiones y en la gran superficie que abarca este fenómeno entre el sur de la Sierra de Alcubierre y el río Ebro. La denominada plataforma de Bujaraloz-Sástago alberga gran cantidad de cubetas de formas redondeadas y elipsoidales, de tamaños muy variables, algunas de las cuales presentan una lámina de agua libre de carácter permanente o temporal, constituyendo pequeñas lagunas.

Una característica peculiar de algunas de estas cubetas endorreicas es la presencia de aguas muy salinas y el desarrollo de procesos de sedimentación evaporítica. Las hipótesis sobre su origen y formación son antiguas y no siempre coincidentes. Sin embargo, aparece citado en todas ellas el hundimiento por disolución de los materiales infrayacentes. En este trabajo se ha realizado una clasificación hidrológica de las cubetas más importantes, para establecer diferencias en cuanto a su comportamiento y posible evolución con las transformaciones de regadío futuras.

La importancia de estas cubetas en el funcionamiento hidrológico del sistema no ha sido objeto de un estudio cuantitativo hasta la fecha. Mediante la elaboración de un balance hídrico y su contraste con las observaciones de campo (ciclos de llenado y vaciado de las lagunas), se ha efectuado una aproximación acerca de la importancia de estas cubetas en el equilibrio hidrológico superficial y subterráneo del sistema.

El estudio hidroquímico de las aguas de las lagunas y de los sedimentos presentes en el fondo de las mismas permite asimismo profundizar en el conocimiento de su génesis y comportamiento.

En resumen, los objetivos del estudio de estas áreas endorreicas son los siguientes: (1) caracterización hidrológica, (2) determinación de la importancia relativa de las lagunas en el funcionamiento hidrológico global del sistema y (3) caracterización y evolución hidroquímica de las aguas lagunares.

Río Ebro

El cauce principal y nivel de base de las unidades hidrológicas definidas con anterioridad es el río Ebro. Por este motivo, se ha realizado un seguimiento de la salinidad de este río desde Zaragoza hasta el Embalse de Mequinenza. Por otro lado, dado que una

parte importante del área a transformar en regadío tiene su drenaje natural en dicho embalse, se ha determinado su perfil de salinidad, tanto longitudinal como vertical.

Las posibles relaciones hidrológicas entre el Sistema Monegros II y el río Ebro no han sido establecidas con anterioridad, posiblemente debido a la consideración de cubeta endorreica, atribuida a la zona situada al Norte del mismo, desde Gelsa hasta el Embalse de Mequinenza.

Sin embargo, la existencia de información previa que indica un incremento de la salinidad en este tramo del río sugiere una posible conexión hidrológica y descarga del sistema Monegros II hacia el Ebro. El efecto de esta posible descarga se ve alterado por la presencia del embalse de Mequinenza y sus características de funcionamiento y regulación de las aguas. Por todo ello, parece interesante profundizar en el estudio de la salinidad actual de las aguas de este tramo del río Ebro, al objeto de poder establecer en el futuro los posibles cambios producidos por los retornos del riego en Monegros II.

Los objetivos del estudio del río Ebro son los siguientes: (1) establecer el nivel actual de salinidad de las aguas en el tramo del río que puede verse afectado por el futuro regadío de Monegros II y (2) analizar el perfil de salinidad longitudinal y vertical de las aguas en el Embalse de Mequinenza.

5.2. REVISION BIBLIOGRAFICA

5.2.1. Cuencas hidrológicas

En la evaluación preliminar del impacto ambiental de los regadíos en el Polígono Monegros II (MOPU-CSIC, 1989) se presenta una división del polígono de riego en 11 dominios hidrográficos para los que se hace una descripción de su extensión, los sectores de riego incluidos y los accidentes topográficos más relevantes de cada uno de ellos. En el apartado de hidrometeorología de este mismo estudio se presenta un cálculo del volumen de agua medio anual y de la escorrentía de cada dominio hidrográfico. El coeficiente medio de escorrentía de Monegros II obtenido en dicho estudio es del 7.69%.

5.2.2. Barranco de Valcuerna

Los estudios hidrológicos del Barranco de Valcuerna son muy escasos y ninguno de ellos se ha efectuado para las condiciones de régimen natural previas al riego.

Los balances hidrosalinos efectuados bajo condiciones de riego en la Cuenca de recepción del barranco dependen sustancialmente del régimen de funcionamiento de los sobrantes de agua del Canal de Monegros, que tienen su salida a través de este barranco. Asimismo, dicho barranco recoge en mayor o menor medida los retornos del regadío implantados a ambos lados de su cauce, así como los efluentes industriales (granjas de aves y ganado porcino) y de poblaciones (Peñalba y, posiblemente, Bujaraloz), lo que complica adicionalmente los balances efectuados.

A pesar de estas limitaciones, dichos estudios son de interés para establecer los

órdenes de magnitud del volumen y salinidad de las aguas subterráneas que descargan a Valcuerna.

En un estudio de impacto ambiental realizado por el MOPU-CSIC (1989) se presenta una descripción muy somera del Barranco de Valcuerna y se calcula un balance de escorrentía media anual de 9.7 Hm³/año, así como unas predicciones de escorrentía bajo riego de 20.9 Hm³/año. Sin embargo, las limitaciones de los datos de entrada utilizados y la metodología empleada permiten cuestionar estos resultados.

En un segundo estudio de impacto ambiental encargado por la D.G.A.(1989) y centrado fundamentalmente en la zona endorreica Bujaraloz-Sástago, se considera al Barranco de Valcuerna como zona de descarga subterránea. El cálculo de la descarga subterránea fue realizado con los datos de CE del agua del cauce (datos S.I.A-D.G.A) y la utilización del programa *Balan*, estableciéndose unas aportaciones de 2.8 L/s/Km.

El informe I.R.Y.D.A (1989) efectúa un balance hidrosalino similar que proporciona unas aportaciones laterales subterráneas de 3.36 L/s/Km con una CE de 23.7 dS/m. Aunque los valores de DGA e IRYDA parecen concordantes, los mismos no alcanzan a justificar mas que el 10% de las aportaciones medidas en la estación de aforos instalada por el SIA y la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) en dicho barranco.

Cuas y García (1990) efectúan un estudio del Barranco de Valcuerna en el que cuantifican una descarga al mismo en el tramo comprendido entre Peñalba y un punto situado aguas abajo de la estación de aforos de 8.5 L/s/Km con una CE de 13 dS/m o, alternativamente, de 7 L/s/Km con una CE de 14 dS/m. Si se comparan estas estimas con los valores medidos en la estación de aforos antes del riego (datos SIA-DGA), las mismas quedan altamente sobrevaloradas.

Finalmente, García et al.(1991) estiman una descarga subterránea de 5.4 L/s/Km y una CE de 14 dS/m a partir de un muestreo de salinidad a lo largo del Bco. de Valcuerna, tomando Peñalba como punto de inicio.

5.2.3. Áreas endorreicas

Uno de los primeros estudiosos de la lagunas de Monegros es Aramburu (1904), quien atribuye su formación a la disolución del material infrayacente. Desde esta fecha hasta 1942, en que Dantín hace una extensa relación del endorreísmo en Aragón, no existen aportaciones importantes. Este autor señala dos causas para la formación de las lagunas: tectónicas y climáticas. Aunque no se fundamentan excesivamente, sus afirmaciones focalizan la atención en los aspectos más importantes, que posteriormente serán explicados por Quirantes (1965). Este autor hace una primera diferenciación entre las lagunas de menor tamaño, que acumulan agua (escasa y estacional) para luego evaporarla, y las lagunas de mayor tamaño, que tienen carácter permanente debido a la intercomunicación con las aguas subterráneas a través de redes de diaclasas.

Posteriormente, Ibáñez (1973) atribuye su génesis a una convergencia de factores estructurales, litológicos y climáticos, a los que ayuda indirectamente la acción del viento.

Quirantes (1965) había señalado ya las causas tectónicas como factor principal de

génesis, observando un mayor desarrollo del endorreísmo en el eje de un sinclinal suave y amplio con terminación periclinal hacia el E. Este autor relaciona asimismo el endorreísmo y la salinidad, dando una explicación coherente con los conocimientos de la época.

La combinación del estudio litológico y tectónico llevado a cabo por Quirantes (1965) le permite aportar una teoría del origen del endorreísmo que ha sido apoyada por otros autores hasta la actualidad: las aguas se infiltran a través de dos importantes sistemas de diaclasas (cartografía del autor) de dirección NE-SO y ONO-ESE. El aporte de aguas a través de las redes de diaclasas está favorecido por la estructura incoherente de los yesos. Se produce una infiltración y una consecuente mineralización bajo las calizas, dando lugar a un karst incipiente.

Posteriormente, este mismo autor (Quirantes, 1978) atribuye su formación y desarrollo tanto a aportaciones de aguas superficiales como subterráneas, corroborando lo afirmado en sus anteriores estudios, aunque por primera vez utiliza el término "circulación de aguas subterráneas".

Pueyo (1979), sintetizando los trabajos realizados con anterioridad a su estudio, resume los factores de generación de las lagunas en (1) factores topográficos estructurales: la horizontalidad de los materiales terciarios favorece el estancamiento de las aguas y su infiltración por diaclasas; estas vías preferentes de circulación originan una disolución de los niveles solubles subterráneos, originando dolinas; (2) factores litológicos: presencia de niveles arcillosos que constituyen el fondo de las lagunas e impiden su desagüe y (3) factores climáticos: la elevada aridez y el viento remodelan las depresiones y son un factor de control geoquímico.

Asimismo, analiza la formación de los lagos salinos presentes en el fondo de las depresiones y generados por intervención de los factores anteriormente mencionados, denominándolos "playas", "playa-lakes" o lagos salinos secos, según Valyaskho (1972). Para ello, considera previamente que se trata de cubetas cerradas sin pérdidas de agua por infiltración profunda, donde la evaporación excede cuantitativamente la entrada de agua y donde dichas entradas, excluidas las de aporte subterráneo, son suficientes para mantener una masa de agua estable. Los tres criterios mencionados (Eugster y Hardie, 1978) no se cumplen en las lagunas de Monegros, según Pueyo, por lo que no se las puede considerar lagos salinos, denominándolas "playas" o "lagos salinos secos".

Sin embargo, Mingarro et al. (1981) hacen una interpretación diferente de la formación y desarrollo de estas depresiones. Se les atribuye un origen tectónico basado en la existencia de escarpes al N de la mayoría de las lagunas. Se hace constar, asimismo, la diferencia de niveles de la lámina de agua en diferentes períodos del año, difíciles de atribuir a la evaporación. Por ello, consideran que existe una rápida infiltración de agua hacia el sustrato. Sus conclusiones estarían en desacuerdo con los autores citados anteriormente, lo cuales abogan por un fondo de laguna cegado e impermeabilizado por sedimentos (Dantín, 1942; Ibañez, 1975; Pueyo, 1979).

Rodríguez Vidal (1982) considera el endorreísmo una consecuencia de la aridez extrema de este área, debido a su posición en la zona morfoclimáticamente más seca de la Depresión. Asimismo, señala a la salinidad como una consecuencia directa del endorreísmo, motivada por la evapoconcentración de sales aportadas en solución por las aguas de arroyada y acumuladas en depresiones cerradas, sobre todo lagunas temporales carentes de drenaje externo.

Respecto a la génesis de estas lagunas, el informe de IRYDA (1989) secunda la teoría de Quirantes (1965), ligando su origen al desarrollo de un Karst de mesa, sin progresión en profundidad, en el que se combinan disolución, subsidencia, colapso y hundimiento, por este orden. En el citado informe se relaciona este proceso al funcionamiento hidrogeológico del sistema.

En el informe de impacto ambiental de la DGA (1989) se propone para la génesis de las lagunas un proceso combinado de disolución y hundimiento. La afluencia, a las zonas deprimidas creadas, de flujos profundos de carácter regional, origina las condiciones de salinidad detectadas en la mayoría de las cubetas.

En el aspecto geoquímico, al menos 18 de ellas han sido consideradas dentro de la categoría de lagos salinos secos (Pueyo, 1979). Las características de este tipo de ambientes han sido ampliamente estudiadas, especialmente en el aspecto de su evolución geoquímica.

Existen numerosos casos de lagos salinos en todos los continentes. Clarke (1924), Livingstone (1963) y Eugster y Hardie (1978) sintetizan gran parte de la información existente para los lagos presentes en los diferentes continentes. Para áreas concretas, son de interés los estudios llevados a cabo por Whitehead y Feth (1961), Jones (1966), Jones et al (1969), Phillips y Van Denburg (1971), Eugster y Hardie (1978) y Spencer et al. (1985) en los EEUU; Kilham (1971), Jones et al. (1977), Eugster y Maglione (1979), Cerling (1979), Kling (1987) y Kilham y Cloke (1990), para Africa; Hutchinson (1957) en Asia; Valyaskho (1972), Pueyo (1979) y Mingarro (1981) en Europa, y Bowler (1976, 1981) en Australia.

El estudio de la evolución de la composición química de las aguas continentales sometidas a un proceso de evaporación natural se ha efectuado en la mayor parte de los lagos salinos del mundo (Gardner, 1957; Garrels y Mackenzie, 1967; Gac et al., 1977; Eugster y Hardie, 1978; Whittig et al., 1982; Pueyo et al, 1991).

Spencer et al. (1985) en sus estudios de grandes lagos salinos presentan una evolución química de las aguas superficiales y profundas considerando la estratificación que se produce en este tipo de lagos. Asimismo, asocian la evolución química a las variaciones de niveles que se han producido en los 50 años de estudio (Great Salt Lake, Utah). El estudio de los sedimentos asociados (Hardie et al, 1978; Eugster y Hardie, 1978; Eugster y Jones, 1979) que reflejan la composición de las aguas en un momento determinado, permite reconstruir la evolución de las mismas a lo largo del tiempo.

Desde el punto de vista de la hidrología, los lagos salinos desarrollados en áreas endorreicas han sido estudiados por Meinzer (1911), Langbein (1961), Bowler (1981) y Spencer et al. (1985). El primer estudio exhaustivo lo presenta Langbein (1961), donde relaciona aspectos hidrológicos y climáticos con propiedades geométricas y contenidos salinos de los principales lagos salinos de EE.UU. La única restricción de los resultados del estudio se refiere a las cuencas cerradas con aportes subterráneos. Este componente hidrológico ha sido contemplado, sin embargo, en los estudios de Meinzer (1911).

Langbein (1961) presenta gráficamente las condiciones climáticas de existencia de lagos salinos en cuencas cerradas. Estas condiciones se basan en datos de temperatura, precipitación y evaporación (recogidos por Kohler et al. (1959) y analizados por el autor). Las principales entradas de agua a una cuenca cerrada son la precipitación directa, la

escorrentía superficial y el aporte subterráneo. La primera sólo es importante, en volumen de agua, en cuencas cerradas extensas ya que, como se ha dicho, este tipo de ambientes sólo se desarrolla en zonas áridas. La escorrentía superficial es considerada como el único aporte de agua a los lagos (Langbein, 1961; Bowler, 1981; Pueyo, 1979). Debido a ello, los balances de agua que se han realizado para los lagos salinos sólo incluyen factores hidrológicos superficiales (aporte de ríos, precipitación y evaporación) y características de la cuenca (área de la cuenca, área de la zona de inundación, etc.).

Con estos parámetros, Langbein (1961) y Bowler (1981) separan por un lado los parámetros climáticos y por otro las características de la cuenca, permitiendo predecir el comportamiento de los lagos ante variaciones climáticas. La clasificación presentada por Bowler (1981) es útil y aplicable a cualquier sistema de lagunas terminal.

La aportación de las aguas subterráneas como componente hidrológico de numerosos lagos fue señalada por Meinzer (1911). Sin embargo, su cuantificación no ha sido desarrollada. Langbein (1961), aunque no incluye la componente subterránea en sus balances, señala que los aportes de agua subterránea suponen un importante factor estabilizador de las fluctuaciones de los lagos. Bowler (1981) no introduce en su balance ningún factor que permita la inclusión de las aguas subterráneas.

La participación de las aguas subterráneas en el balance hídrico de las lagunas de Monegros fue apuntada por Quirantes (1978) y apoyada por Pueyo (1980). La relación subterránea entre lagunas se establecería mediante la red de diaclasas. Sin embargo, Ibáñez (1975) no considera la aportación subterránea y atribuye la existencia de agua en las lagunas y su localización a la presencia de afloramientos de rocas impermeables que impiden la infiltración del agua procedente exclusivamente de las precipitaciones.

Mingarro et al. (1981) hacen hincapié en las grandes diferencias de nivel en el período invernal con respecto al resto del año, hecho que atribuyen simplemente al proceso de evaporación.

Cuchí (1986) considera las precipitaciones directas, la escorrentía superficial y el flujo subterráneo o bien hipodérmico como los mecanismos de aporte de agua a las cubetas.

La utilización de rasgos morfológicos en la superficie lagunar como forma de conocer la existencia de descargas subterráneas ha sido objeto de estudio por parte de Neal (1975). Finalmente, algunos métodos para estimar estas descargas a partir de las acumulaciones salinas o de las costras eflorescentes han sido desarrollados por Feth et al. (1962).

5.2.4. Río Ebro

La salinidad de las aguas del río Ebro ha sido un tema debatido en los años 70-80. Los trabajos más relevantes, bajo este punto de vista, se encuentran recogidos en el estudio interdisciplinar "Sistema Integrado del Ebro" (C.C.C.T.H-A., 1986). Las conclusiones del estudio, en lo que al proceso de salinización se refiere, son las siguientes: (1) en los tramos medio y final del Ebro la salinidad de las aguas superficiales es relativamente alta como consecuencia de la geología, suelo, clima y del creciente uso del agua; (2) el río Ebro descarga al Mediterráneo una masa de sales de 6.5 millones de

toneladas por año; (3) el balance hidrosalino de la cuenca ha identificado las fuentes y sumideros puntuales y difusos de agua y sales más importantes y ha demostrado la necesidad de una ampliación de la red de muestreo para su mejor comprensión; (4) los suelos salinos cartografiados en la cuenca representan 310.000 ha y se encuentran situados en su zona más árida dentro de la isoyeta de 500 mm; (5) paralelamente, los niveles de salinidad de las aguas superficiales adquieren una distribución de tipo elíptico con el río Ebro como eje mayor, con peores calidades en el centro de la depresión; (6) en el tramo final del Ebro, la salinidad de las aguas ha aumentado en los últimos 20 años a una tasa anual de 10 mg/L de sólidos disueltos totales. Esta tendencia se duplica durante los meses estivales respecto a la deducida para los meses de invierno. Estos incrementos son debidos fundamentalmente a la agricultura de regadío y al crecimiento demográfico e industrial de la cuenca; (7) el modelo hidrosalino calibrado en el polígono de riego de La Violada (Huesca) predice satisfactoriamente la cantidad y calidad de las aguas de retorno de regadío y permite evaluar aquellas acciones más eficaces tendentes al control de la salinidad de dichos efluentes.

Con posterioridad, Aragüés (1984), Alberto (1984,1986), y Navas (1989), han continuado aportando datos al conocimiento del río en el aspecto de la calidad química de sus aguas.

Desde el punto de vista de la relación hidrológica del río con el área de estudio, en los estudios de impacto ambiental citados anteriormente se hacen valoraciones y estimaciones acerca del papel del río en el drenaje (subterráneo) de la zona sur de Bujaraloz. La existencia o no de descarga de las aguas subterráneas hacia el Ebro de forma puntual o difusa ha sido muy cuestionada. Así, en el informe MOPU-CSIC (1989) no se considera la descarga subterránea al río Ebro, por considerarlo "un accidente topográfico de tal magnitud que constituye una divisoria hidráulica neta, de tal modo que las líneas de flujo no la atraviesan". Sin embargo, el informe IRYDA (1989) sitúa en el río Ebro la zona de descarga sur de la Plataforma Bujaraloz-Sástago. Su estimación es de 0.15 Hm³/año. Finalmente, el informe D.G.A (1989) considera una descarga, entre el Bco. de Valcenicera y el Bco. de Valcuerna, de 26.8 Hm³/año. La disparidad de las estimaciones pone de manifiesto el uso de metodologías no contrastadas y de dudosa fiabilidad.

Finalmente, debe considerarse que estos trabajos efectúan estimaciones cualitativas y algunos son meramente bibliográficos. La cuantificación de la descarga es el resultado de la aplicación de modelos predictivos con escasos datos de entrada, por lo que estos resultados deben ser considerados únicamente como primeras aproximaciones.

5.3. MATERIAL Y METODOS

5.3.1. Descripción física de las cuencas hidrológicas

Se ha efectuado la división del área de estudio en las diferentes cuencas hidrológicas superficiales sobre el mapa topográfico a escala 1:200.000 (Figura 48), donde se planimetraron asimismo las superficies de cada cuenca. Las unidades hidrológicas superficiales se trasladaron, mediante pantógrafo, a escala 1:50.000, con objeto de superponer los mapas temáticos y obtener así las características principales de las unidades hidrológicas. Los mapas temáticos utilizados fueron el mapa de suelos de

RENASA (1981), el mapa geológico (Plano 2) y los mapas de cultivos y aprovechamientos del M.A.P.A. (1978).

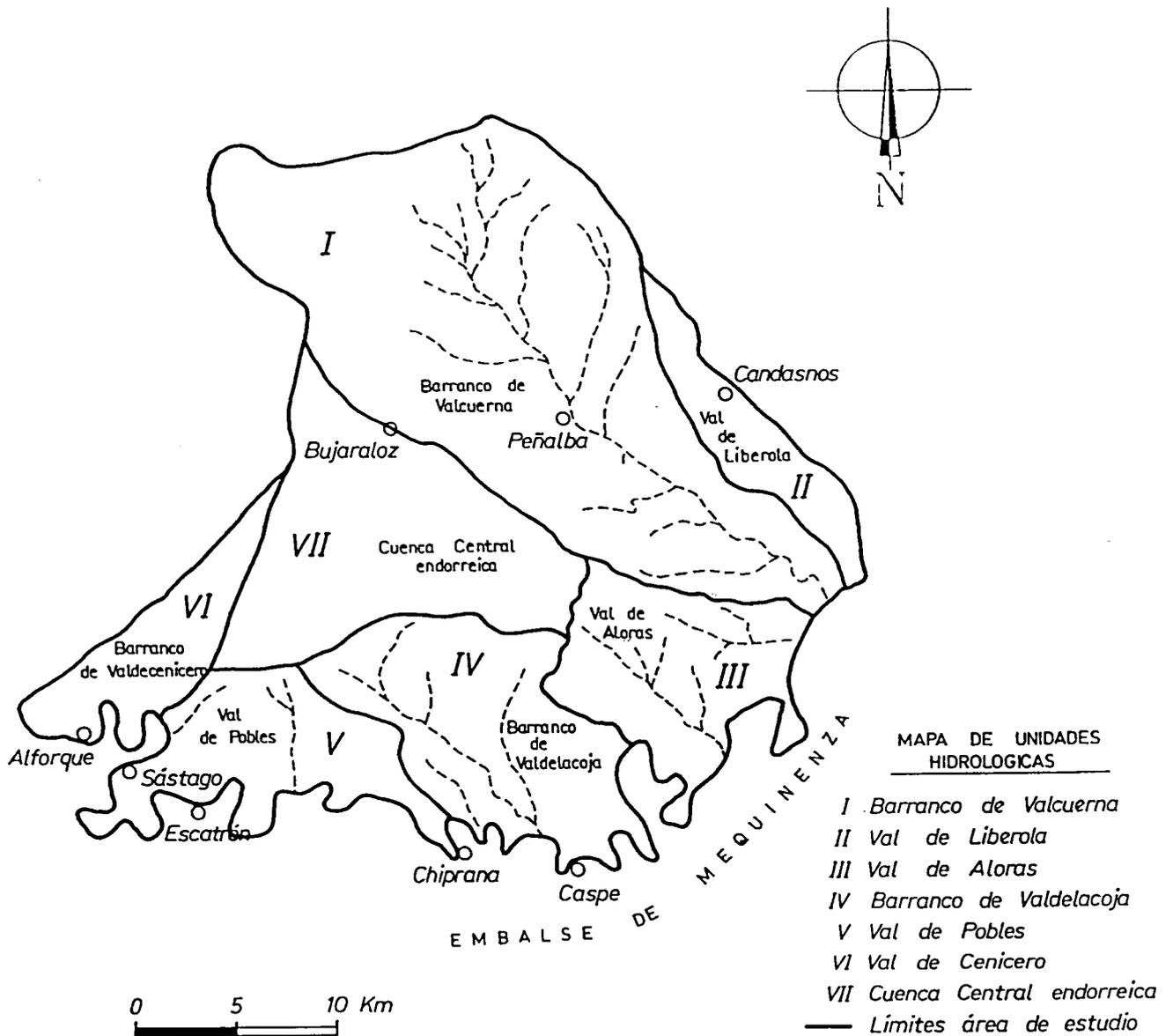


Figura 48. División del área de estudio en unidades hidrológicas superficiales.

El cálculo de las aportaciones superficiales de cada unidad hidrológica se ha realizado multiplicando la parte de la precipitación que se convierte en escorrentía superficial por la superficie de cada unidad hidrológica. La precipitación utilizada para cada unidad hidrológica ha sido la correspondiente al año medio de la estación climática más próxima (capítulo 2). Los coeficientes de escorrentía empleados (Ce_1 y Ce_2) se presentan en el apartado siguiente.

5.3.2. Barranco de Valcuerna

Estación de aforos y calidad del agua

Esta estación fue construida en el verano de 1985 por el S.I.A., con el asesoramiento de la C.H.E., y comenzó a proporcionar datos de caudal a partir de noviembre de 1985. En la actualidad, la estación está integrada en la red de aforos de la C.H.E. con el número 231 ("Barranco de Valcuerna") y dispone de una caseta de 6 m² de superficie en la que están ubicados un limnígrafo (C.H.E.) y un muestreador automático de agua (S.I.A.). Está situada bajo el puente que atraviesa el Barranco de Valcuerna en el Km. 25.8 de la carretera Candasnos-Caspe.

La estación tiene un vertedero rectangular de labio grueso de 100 cm de longitud para la medida de caudales bajos o moderados y otro de 395 cm de longitud para caudales elevados. Las características principales de la estación se presentan en la Figura 49.

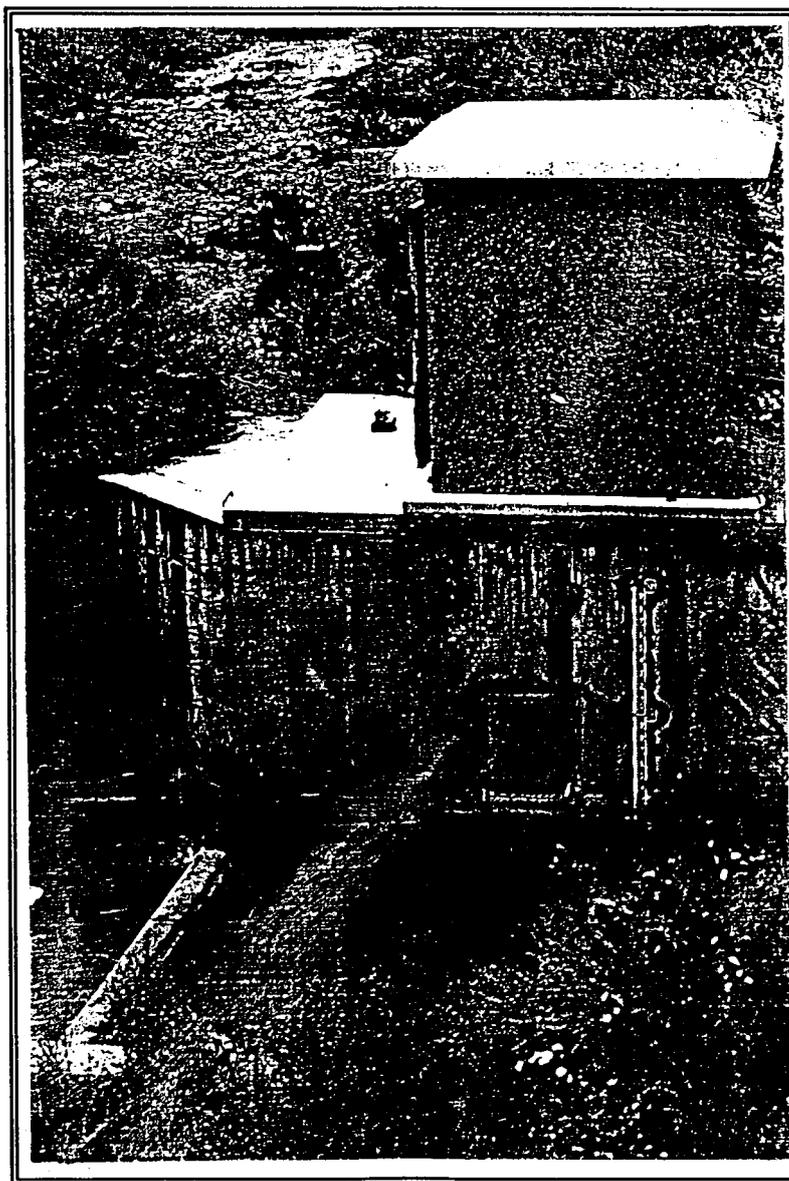


Figura 49. Barranco de Valcuerna: estación de aforos y calidad del agua (nº 231 de la C.H.E.)

Durante el período de funcionamiento de la estación se han efectuado varios cambios de diseño, que han afectado al procedimiento de medida del calado. Hasta junio de 1989 el limnógrafo era neumático y, a partir de dicha fecha, es de boya.

Los aforos del caudal con minimolinete fueron efectuados de forma regular por personal especializado de la C.H.E. La ecuación de la curva de gasto, o relación entre el caudal (Q , m^3/s) y el calado (h , m) para la sección estrecha es (Fig.50a):

$$Q = 11.32 h^{3.43}; \quad R^2 = 0.95; \quad n = 35 \quad (10)$$

La curva de gasto conjunta para la sección ancha y estrecha es (Fig. 50b):

$$Q = 8.12 h^{3.24}; \quad R^2 = 0.97; \quad n = 46 \quad (11)$$

Finalmente, desde el 21 de junio de 1989, la nueva curva de gastos de la estación modificada es (Fig.50c):

$$Q = 0.012 + 0.32h + 8.82 h^3; \quad R^2 = 0.999; \quad n = 7 \quad (12)$$

Algunos problemas relacionados con la colocación de los limnigramas (Julio a Octubre de 1988), obras realizadas en la estación (Octubre 1987 a 11 de Enero 1988; Junio 1989; Febrero 1990) y la falta de limpieza del cauce en el entorno de la estación de aforos (Junio 1989) son las circunstancias que explican la ausencia de algunos datos en la serie de caudales resumidos en el Anexo 4.

Las lecturas continuas del calado se recogieron en los correspondientes limnigramas semanales (escala 1:10), verificando asimismo semanalmente la coincidencia de dichos valores con las lecturas del escalímetro instalado junto al vertedero. La conversión de las lecturas de calado de los limnigramas en caudal se realizó a partir de las curvas de gasto presentadas anteriormente. Con la suma de los caudales medios diarios se obtuvieron (1) las aportaciones mensuales y totales del régimen natural (1 Enero a 15 de Septiembre de 1986) y (2) las aportaciones mensuales y anuales del período 1986 a 1990. Las aportaciones de los meses con series de datos incompletas o inexistentes se calcularon a partir de los caudales medios mensuales del año correspondiente.

En Febrero de 1986 se instaló un muestreador automático portátil "Manning" modelo S-4040, que recoge una muestra de agua a través de un tubo de aspiración y que consiste en un sistema que consta de una batería de 12 V, un compresor, una cámara volumétrica, un controlador y un brazo rotatorio que dispensa las muestras a 24 recipientes de PVC situados en la parte inferior del muestreador.

El muestreo consta de cuatro fases: en primer lugar, se purga el sistema con aire para eliminar restos de muestreos anteriores y limpiar los conductos; a continuación se aspira el agua y se recoge en la cámara volumétrica; posteriormente se vuelve a purgar con aire el conducto de aspiración para evitar obstrucciones y la contaminación de la muestra y, finalmente, la muestra se dispensa al correspondiente recipiente de PVC.

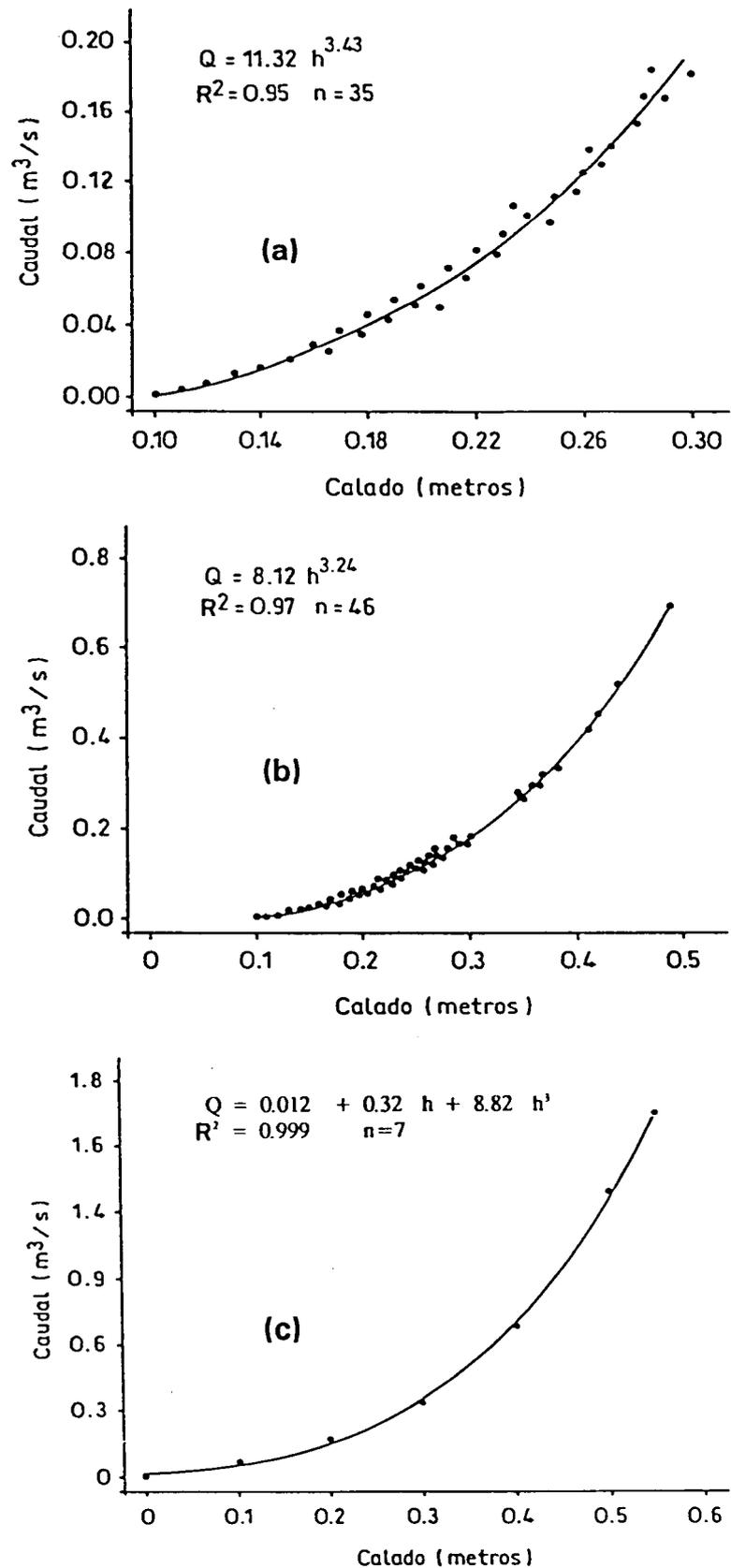


Figura 50. Barranco de Valcuerna: curvas de gasto de la estación de aforos. (a) Sección estrecha. (b) Sección estrecha + ancha (hasta 21-6-92). (c) Sección estrecha + ancha (desde 21-6-92).

En líneas generales, el muestreador funcionó satisfactoriamente, aunque en el período estudiado ha sufrido dos averías relacionadas con el sistema de vacío, una relacionada con la inmovilización del brazo rotatorio y, esporádicamente, las baterías se han descargado antes de completar el ciclo de 24 días. Durante el año 1990, debido a las obras de remodelación de la estación de aforos llevadas a cabo por la C.H.E., el muestreador automático estuvo sin funcionar un período de cuatro meses.

El sistema de muestreo adoptado consistió en la toma de dos muestras diarias de 250 ml cada 12 h, que se dispensan al mismo recipiente. Cada 24 días (un ciclo completo) se recogieron los recipientes, se sustituyeron por otros y se reemplazó la batería.

Las muestras de agua se transportaron al laboratorio y se midió la CE. Puntualmente se analizaron los cationes y aniones mayoritarios por los procedimientos descritos anteriormente. Una vez caracterizadas las aguas desde el punto de vista químico, los análisis iónicos posteriores sólo se realizaron cuando la CE aumentó o disminuyó de forma sustancial respecto a los valores generalmente medidos.

La elaboración del hidrograma de la estación de aforos nº 231 ha permitido separar los componentes correspondientes a las escorrentías directa, hipodérmica y subterránea.

Para el desglose de la componente subterránea se revisaron los limnigramas correspondientes al régimen natural, con objeto de seleccionar las series de datos más adecuadas para la separación por el método de Barnes (1976). Dicho autor propone la representación gráfica de la curva de agotamiento del hidrograma en papel semilogarítmico (donde el caudal es la escala logarítmica y el tiempo la escala lineal). Puesto que la curva de agotamiento tiene por ecuación $Q = Q_0 \times e^{-\alpha t}$ (13), su representación en papel semilogarítmico es una recta de pendiente $-\alpha$, o pendiente de la recta de escorrentía subterránea.

Una vez obtenida la escorrentía subterránea, ésta se restó del hidrograma total y en el hidrograma resultante (escorrentía hipodérmica + escorrentía superficial) se ajustó la recta correspondiente a la escorrentía hipodérmica. Se ha considerado que el tramo del hidrograma inmediatamente anterior al de la descarga subterránea está constituido fundamentalmente por la escorrentía hipodérmica, aunque no es descartable que pueda tratarse asimismo de una descarga subterránea de origen y régimen distinto a la anterior. Calculada dicha escorrentía, se restó también del hidrograma y se obtuvo un nuevo hidrograma en el que la única componente es la escorrentía superficial.

Aunque durante el período analizado (de Enero a Septiembre de 1986) se registraron 9 episodios lluviosos de más de 10 L/m² de precipitación, la mayor parte de ellos no produjeron variaciones de caudal que permitieran construir una curva de agotamiento suficientemente precisa. La curva de agotamiento seleccionada se refiere al hidrograma correspondiente a la lluvia del día 18 de Junio.

Respecto a las estimas de los coeficientes de escorrentía medios, en ensayos previos realizados en la zona (IRYDA, 1985, 1989; MOPU-CSIC, 1989; SIA-DGA, 1990, 1991) se obtuvieron valores del 13%, 0%, inferior al 1%, 7.7% y 42%, respectivamente. Los valores de SIA-DGA se obtuvieron bajo riego por aspersión en parcelas de 0.5 m², por lo que no son representativos de los valores obtenidos en eventos lluviosos a nivel cuenca

de recepción.

En este trabajo, el procedimiento utilizado para estimar el coeficiente de escorrentía es el siguiente:

(1) Del hidrograma correspondiente a la precipitación del 18 de Junio de 1986 se descontó el flujo mínimo (6 L/s) obtenido en la estación de aforos, que puede considerarse como flujo base o descarga subterránea.

(2) El hidrograma resultante se planimetró entre los tiempos correspondientes al inicio y cese de la escorrentía superficial, obteniéndose así un volumen V_2 de escorrentía superficial. Aunque en dicha escorrentía está también comprendida la hipodérmica, su valor es despreciable frente a la primera. El tiempo de inicio se determinó visualmente del hidrograma, y el tiempo (T, días) a partir del pico del hidrograma en el que cesó la escorrentía superficial se determinó a partir de la expresión (Linsley et al., 1975):

$$T = A^{0.2} \quad (14)$$

donde A (millas cuadradas) es el área de la cuenca. Dicho valor resultó ser de 2.4 días.

(3) A partir de la precipitación registrada en dicha fecha (valor medio de las precipitaciones medidas en Candasnos y Peñalba) y de la superficie de la cuenca de recepción de la estación de aforos (237 Km²), se obtuvo el total de agua caída en la cuenca (V_1). El coeficiente de escorrentía Ce_1 (%) se calculó a partir de:

$$Ce_1 = (V_2/V_1) \times 100 \quad (15)$$

(4) El mismo procedimiento fue utilizado a partir de los hidrogramas fiables construidos para las fechas con precipitaciones diarias superiores a 10 mm registradas en el período de régimen natural. No se tuvieron en cuenta los hidrogramas en los que el caudal aforado pudo estar afectado por intervenciones externas (desagües del Canal de Monegros, riego de determinadas superficies de la cuenca, existencia probable de retornos de flujo de riego, desviación del cauce por obras, etc.). Para cada uno de los eventos lluviosos se obtuvo un coeficiente de escorrentía y la media de todos ellos fué el valor de Ce_2 .

Muestreo del Barranco de Valcuerna

Un primer muestreo del barranco (R. Aragüés; Comunicación Personal) se efectuó el 20 de Enero de 1984, partiendo de Peñalba (Km.0) y llegando al Embalse de Mequinenza (Km.18) a través del camino que discurre paralelo al barranco. El punto kilométrico del muestreo, la CE medida "in-situ" (dS/m a 25°C) y el caudal (L/s) estimado visualmente

(este último dato es simplemente orientativo y a efectos de comparación entre los puntos de muestreo) se presentan a continuación:

Km.	Localización	CE (dS/m)	Q (L/s)
0	Peñalba. Puente N-II	-	seco
1.5	Alcantarillado Peñalba	0.9	2
6		12.4	5
7	Puente Candasnos-Caspe sobre Bco. Valcuerna	13.2	10
10		13.8	20
13	Afloramiento yesos	14.4	25
15	Pozo entubado	14.2	10
16		-	seco
18	Embalse Mequinenza (agua del embalse = 1.2 dS/m)	-	seco

Los muestreos sistemáticos del barranco desde el túnel de Alcubierre hasta el embalse de Mequinenza se iniciaron en Mayo de 1987. En la Figura 51 aparecen los puntos de muestreo, situados generalmente sobre puentes o cruces del cauce. La superficie regada del Bco. de Valcuerna, aguas arriba de Peñalba, se iniciaba entre los puntos V-2 y V-3 y finalizaba en el punto VFR (final del regadío). Generalmente, los muestreos tuvieron una periodicidad mensual durante la época de riego (Abril a Septiembre) y bimensual durante la época de no riego (Octubre a Marzo).

Además de estos once puntos fijos de control, se localizaron diversos rezumes y manantiales a lo largo del cauce del barranco que se muestrearon y analizaron puntualmente. El inicio del regadío a ambos lados del cauce y la existencia de un caudal circulante muy elevado han dificultado la repetición de los muestreos y el seguimiento temporal de la evolución de estos puntos. En la Figura 51 dichos puntos aparecen anotados con la letra "D".

Aguas arriba de Peñalba, el cauce está sufriendo continuas transformaciones como consecuencia de la puesta en riego de los sectores I y II. Ello ha supuesto que en ocasiones los muestreos hayan sido incompletos o de menor fiabilidad.

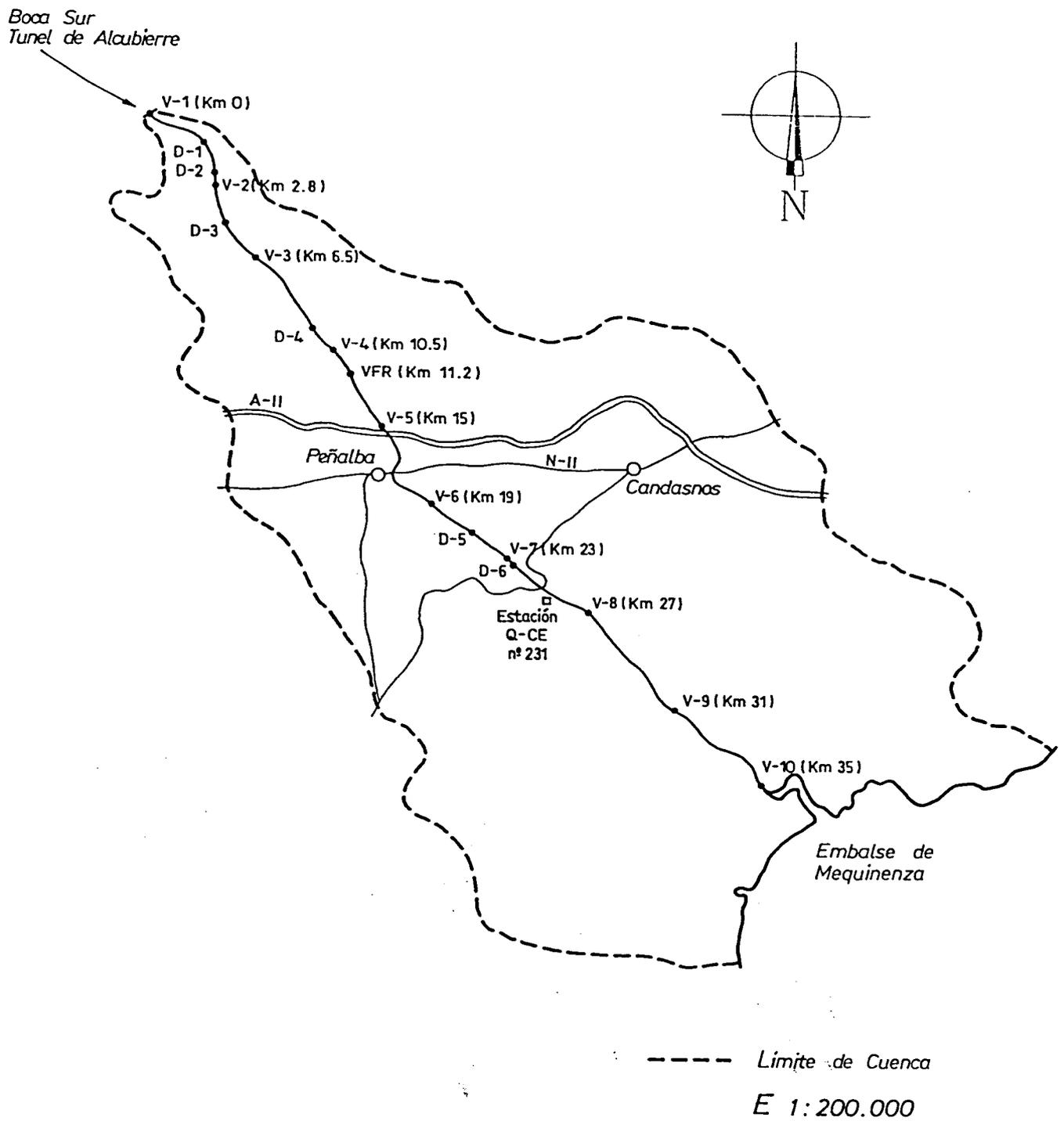


Figura 51. Barranco de Valcuerna: localización de los puntos de muestreo (V-i), puntos de rezume o manantiales (D-i) y de la estación de aforos nº 231.

En todos los muestreos se realizaron medidas de CE "in situ" y se recogieron periódicamente muestras de agua para su determinación analítica en el laboratorio. Siempre que fue posible, la determinación de carbonatos y bicarbonatos se realizó dentro de las 24 horas posteriores al muestreo.

Durante el período de muestreo (1987-1990), no existieron superficies regadas aguas arriba del punto V-2. A finales del año 1987 se puso en regadío una superficie indeterminada por encima del punto V-3. El punto VFR señala el final de la superficie regada aguas arriba de Peñalba durante los años 1987 y 1988. Aguas abajo de esta localidad no hubo superficie regada durante los años 1987-1989, pero en los dos años siguientes se implantaron sistemas fijos de aspersión en el área, entre Peñalba y la estación de aforos nº 231. Aguas abajo de Peñalba se han aprovechado las aguas para riego de manera irregular.

Otro aspecto a tener en cuenta en la interpretación de los resultados es el vertido de las aguas residuales urbanas de Peñalba, que tiene lugar a 50 m aguas abajo del punto V-6. La CE de este vertido es del orden de 1 a 2 dS/m. Asimismo, en las proximidades de Peñalba, entre los puntos V-5 y V-6, se producen vertidos incontrolados y sin depuración previa de granjas porcinas próximas al cauce que tienen un pH = 8.5 y una CE = 9.40 dS/m, lo que puede explicar algunos incrementos puntuales de CE entre estos puntos.

Estimación de la Componente Subterránea

La primera estimación se hizo a través de la descomposición del hidrograma por el método de Barnes explicado anteriormente. Además de ésta, se efectuó la estimación siguiendo otras dos metodologías:

(1) Metodología previamente aplicada por Cuas et al. (1990) al tramo de Valcuerna comprendido entre Peñalba y el Embalse de Mequinenza. En esta metodología se supone que el caudal y la concentración salina varían a lo largo del cauce debido a las aportaciones subterráneas. El balance se inicia en el punto 0, donde se conoce la concentración (C_0), y finaliza en el punto f, donde se conoce la concentración (C_f). Asimismo, en un punto t entre 0 y f se conocen el caudal (Q_t) y la concentración (C_t). Dicho punto es la estación Nº 231. Las estimas se han efectuado asumiendo que la descarga subterránea (Q_s) es constante en el tramo de cauce entre los puntos 0 y t, y linealmente decreciente a partir de dicho punto t.

Los parámetros que se pretende conocer (C_s y Q_s) pueden obtenerse a partir de los valores de C medidos en dos puntos del cauce (en nuestro caso se les hace coincidir con los puntos de muestreo V_1 a V_{10} del Cauce de Valcuerna) resolviendo las siguientes ecuaciones:

$$C_{V_t} = C_s - (C_s - C_0) \frac{Q_0}{Q_{V_t}} \quad (16)$$

$$C_{V_{n+1}} = C_s - (C_s - C_0) \frac{Q_0}{Q_{V_{n+1}}} \quad (17)$$

donde C_{V_n} y $C_{V_{n+1}}$ son las CEs en los puntos V_n y V_{n+1} del barranco (Figura 51), y C_0 y Q_0 son la concentración y caudal en el punto inicial del tramo considerado. Los valores óptimos de C_s y Q_s se obtienen minimizando, por el método de Marquardt, la suma de los cuadrados de las diferencias entre los valores medidos y los calculados.

Se aplicaron dos modelos (I y II) representativos de dos supuestos diferentes: en el modelo I se procedió a ajustar las observaciones considerando que la descarga empezaba a decrecer en el punto t (e.a. n° 231) y se anulaba en un punto que es ajustado por el modelo. En el modelo II la distancia a la que se anula el flujo se estableció previamente, fijándola en el punto donde se detectó el sumidero en el muestreo de 1984 (Km. 33.5 del cauce).

La metodología se aplicó inicialmente a los quince muestreos realizados en el cauce de Valcuerna durante el período Mayo 1987 a Junio 1990 para (1) el tramo de cauce situado entre el túnel de Alcubierre (V-1) y el embalse de Mequinenza (V-10) y (2) el tramo entre el Puente aguas abajo de Peñalba (V-6) y el embalse de Mequinenza (V-10). Posteriormente fueron desestimados los muestreos en los que no se conocía el caudal de salida del túnel de Alcubierre o en los que se estaba regando aguas arriba o abajo de Peñalba.

(2) Metodología en la que se hace uso de un balance de masas simplificado: si se considera un tramo del cauce en el que la concentración y caudal de entrada es C_{es} y Q_{es} (punto inicial del tramo), el de salida es C_{et} y Q_{et} (punto final del tramo), y existen unos flujos de entrada subterráneos C_{ss} y Q_{ss} , el balance de masas establece que:

$$C_{et} Q_{et} = C_{ss} Q_{ss} + C_{es} Q_{es} \quad (18)$$

donde despejando Q_{ss}

$$Q_{ss} = \frac{C_{et} - C_{es}}{C_{ss} - C_{es}} Q_{et} \quad (19)$$

La concentración C puede sustituirse por la CE si se asume la constancia en la relación entre ambas variables. Los valores de CE_{ss} son los medidos en las diferentes fechas de muestreo en los puntos V-1 a V-7 situados aguas arriba de la estación de aforos. Los valores de CE_{et} y Q_{et} corresponden a los valores obtenidos en la estación de aforos n° 231 en dichas fechas de muestreo. Los valores de CE_{es} corresponden al valor de $CE = 14$ dS/m del caudal de base del Bco. de Valcuerna en régimen natural. Si se asume que este valor de CE permanece constante durante los primeros años de transformación en regadío, lo cual parece conceptualmente razonable dada la baja permeabilidad del medio poroso en consideración, la ecuación 11 permite estimar el valor del caudal de los flujos subterráneos en el tramo considerado. Se calculó por un lado el valor del caudal de flujo subterráneo entre cada punto V_n y la estación de aforos y por otro el valor de este mismo flujo entre

cada dos puntos de muestreo ($V_n - V_{n+1}$), a fin de estimar el valor total de la descarga subterránea hasta la estación de aforos y su distribución por tramos de cauce, respectivamente.

Balance de Masas

La masa de sales diaria exportada por las aguas del barranco de Valcuerna en la estación de aforos N° 231 se ha obtenido a partir del caudal y sólidos disueltos totales (TDS) medidos en dicha estación. Los datos de caudales diarios se obtuvieron a partir de las lecturas de calado de los limnigramas y de las curvas de gasto presentadas con anterioridad. El TDS diario se obtuvo de los valores de CE diarios transformados a TDS con la correspondiente ecuación de regresión (Fig. 52). Dicha ecuación está basada en 115 análisis de CE y TDS de las aguas recogidas en la estación n° 231. El TDS (mg/L) se ha calculado a partir del residuo seco obtenido al evaporar 0.1 L de agua filtrada por filtro Whatman (42) hasta pesada constante en estufa a 110 °C.

A partir de la masa diaria de sales se obtuvo la masa de sales exportada en régimen natural (antes de la implantación del regadío en la Cuenca), la masa de sales anual en régimen de regadío (posterior a la implantación del riego en la Cuenca) y la masa de sales de los períodos de riego (Abril a Octubre) y no riego (Noviembre a Marzo). Dividiendo dichas masas por los períodos de tiempo en días correspondientes, se obtiene la masa media diaria exportada en cada período.

La estimación del caudal y masa de sales difusos procedentes del regadío se realizó restando al caudal medio y masa de sales media diarios (obtenidos para el período de no riego sin aportaciones del canal de Monegros) el caudal medio y masa de sales media diarios obtenidos para ese mismo período en régimen natural. El TDS correspondiente a estos flujos difusos de riego se obtuvo dividiendo la masa de sales por la aportación. Finalmente, la CE de estos flujos se obtuvo transformando el TDS con el factor de transformación entre ambos parámetros obtenido en la ecuación de regresión que se muestra en la figura 52.

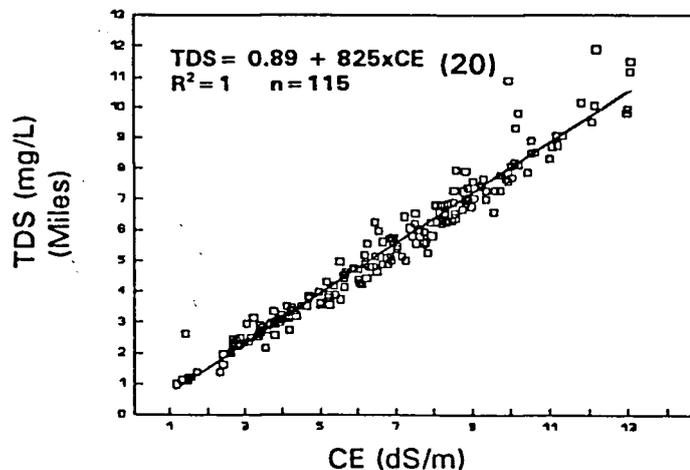


Figura 52. Relación entre la CE y el TDS del agua del Barranco de Valcuerna en la estación de aforos n° 231.

5.3.3. Areas endorreicas

Clasificación hidrológica

La aplicación de las clasificaciones hidrológicas propuestas por algunos autores citados en la revisión bibliográfica es útil para establecer la participación de determinados componentes del ciclo hidrológico en la génesis y evolución de las lagunas.

Para esta clasificación se seleccionaron las quince cubetas endorreicas que, de forma temporal o permanente, dispusieron de una lámina de agua libre y para las que se adoptó el término "laguna".

De las distintas clasificaciones discutidas en la revisión bibliográfica, se utilizó la propuesta por Bowler (1981), ya que la misma se desarrolló para áreas endorreicas generadas por hundimiento cárstico, génesis parecida a la comúnmente aceptada para el área de estudio. Esta clasificación se basa en la tipificación de las lagunas mediante la representación gráfica en papel logarítmico del factor climático F_c (eje X) frente al factor fisiográfico F_f (eje Y), y permite dividir las lagunas permanentes, temporales o efímeras y secas (Figura 53).

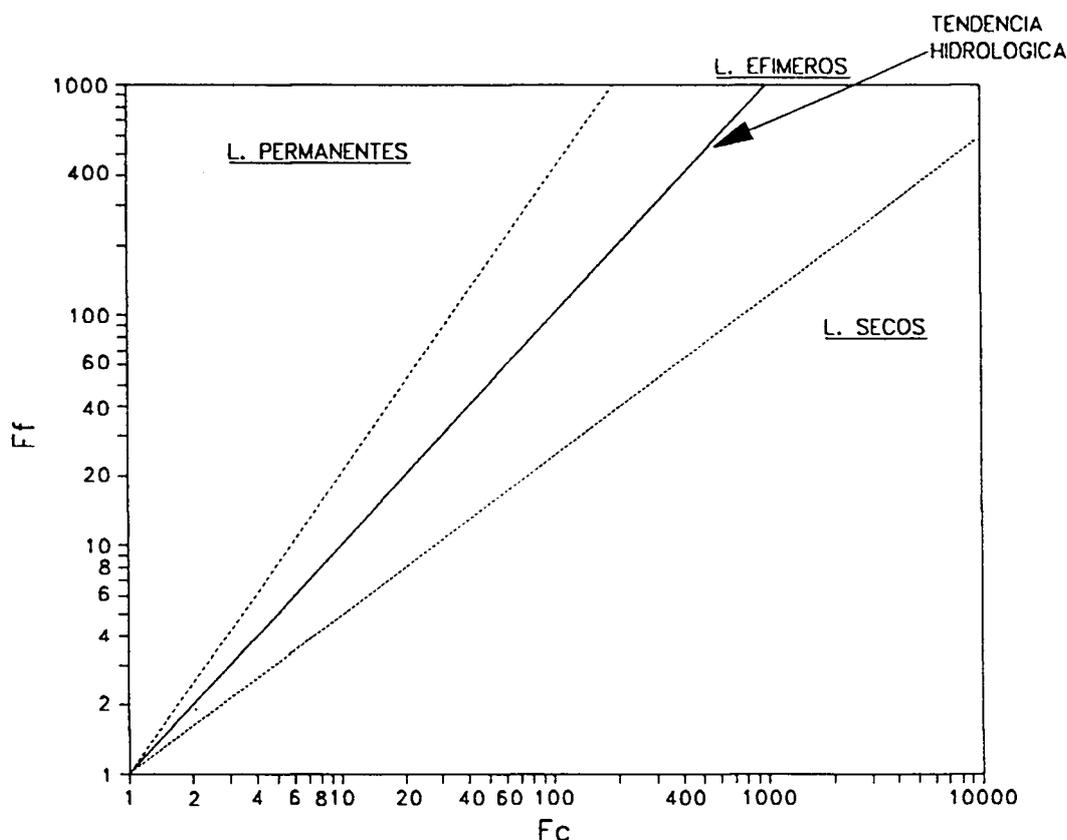


Figura 53. **Areas endorreicas: clasificación hidrológica de las lagunas, basada en la relación entre el factor climático (F_c) y el factor fisiográfico (F_f) definidos por Bowler (1981).**

El factor climático (Fc) se calcula a partir de la precipitación media (P), la escorrentía superficial P' y la evaporación media (E) de la lámina de agua libre (tanque Clase A) en el período considerado, por medio de la expresión:

$$F_c = ((E-P)/P') + 1 \quad (21)$$

Las precipitaciones utilizadas fueron las registradas en los pluviómetros situados junto a las lagunas de La Salineta, Guallar, Piñol, Camarón, Amarga II, Playa, Hoyo de Benamud y Hoyo de Agustín. A las lagunas sin pluviómetros (Pito, Pueyo, Muerte, Rebollón, Rollico, Amarga I, Saladar, Salobral y Pez) se les asignó la precipitación medida en la laguna mas próxima. La escorrentía superficial P' se obtuvo de $P' = P \times C_e$, donde $C_e = 3.7\%$ es el coeficiente de escorrentía obtenido de forma experimental por Beltrán (1989) en zonas topográfica, edafológica y geomorfológicamente similares (Hoyo Agustín y Hoyo Benamud) a las de las lagunas. La evaporación utilizada fue la medida en los tanques clase A de las estaciones climáticas de Candanos (para Amargas I y II) y Valfarta (resto de lagunas). En las lagunas con unos sólidos disueltos totales superiores a 30.000 ppm (todas excepto Pez, Rebollón, Saladar, Amarga I y Amarga II), la evaporación se multiplicó por el factor 0.8 para tener en cuenta la menor evaporación de las aguas salinas (Bowler, 1981).

El factor fisiográfico (Ff) se calcula a partir de los valores de la cuenca de recepción de la laguna (Ac) y del área de máxima inundación (AI) por medio de la expresión:

$$F_f = A_c/AI \quad (22)$$

El área de la cuenca y el área de máxima inundación se obtuvieron por planimetrado del plano topográfico (E 1:5000) del Plan General de Transformación en Regadío del IRYDA.

En primer lugar, se clasificaron las lagunas para los datos medios del período 1989-1990. Los datos climáticos corresponden a los valores medios anuales de dicho período. El valor de AI utilizado para este cálculo del factor fisiográfico corresponde al área de máxima inundación (AI₁), definida por el área ocupada por el sedimento salino.

En segundo lugar, se efectuó una clasificación hidrológica mensual para el período Enero de 1989 a Septiembre de 1990. Los factores fisiográficos mensuales se obtuvieron dividiendo el área de la cuenca (Ac) por el área inundada (AI₂) estimada visualmente en la primera semana de cada mes y expresada como una fracción de la superficie de máxima inundación. Los factores climáticos mensuales se obtuvieron a partir de las precipitaciones mensuales recogidas en los pluviómetros y de la evaporación mensual estimada a partir de las medidas del tanque clase A.

En tercer lugar, la metodología de Bowler permite predecir la evolución hidrológica de las lagunas producida por alteraciones antrópicas que afectan a los factores climático o fisiográfico. La transformación en regadío conduce principalmente a la modificación del factor climático y, en situaciones extremas, puede conducir asimismo a la modificación del factor fisiográfico de las lagunas. Al objeto de predecir el efecto del futuro regadío, se planimetraron en hojas topográficas a escala 1:5.000 del Plan General de Transformación, las futuras superficies de regadío presentes en las cuencas de recepción de cada laguna. Todas ellas, excepto Salobral, tienen una futura superficie regable de al menos el 25% de la superficie total de la cuenca, por lo que es de esperar una influencia importante del regadío sobre el factor climático.

El efecto de la transformación en regadío se simuló según dos procedimientos diferentes. En el primer procedimiento se contemplaron tres supuestos hipotéticos: (1) un 5 y un 15% de la dotación media anual de riego (8.625 m³/ha según el Plan General de Transformación del IRYDA) llega de forma subsuperficial (C_s) a las lagunas, por lo que el volumen correspondiente de agua se suma a la variable P de la ecuación de Bowler; (2) la escorrentía superficial generada como consecuencia de la aplicación de esta dosis de riego se calcula para cinco coeficientes de escorrentía: 3.7, 5, 25, 50 y 90%. Estos valores se suman en cada caso a la variable P' de la ecuación de Bowler; (3) a la evaporación de la lámina de agua libre no se le aplica el factor de corrección de 0.8, pues se considera que los efluentes de riego diluirán las aguas salinas de las lagunas. La combinación de (1) y (2) produce en definitiva quince supuestos que dan lugar a otros tantos factores climáticos. Si la aportación estimada del regadío no implica una altura de la lámina de agua superior a la cota de máxima inundación de la laguna, el factor fisiográfico se considera constante. Si el volumen de agua generado por el regadío implica una altura de la lámina de agua superior a la cota de máxima inundación, se planimetrar las nuevas superficies inundadas (A_{I3}) y se obtienen los nuevos valores para el factor fisiográfico en situación de regadío.

El segundo procedimiento para la estima del efecto del regadío sobre las áreas de inundación se efectuó calculando el volumen que por esta causa puede llegar a las lagunas. Para ello, se consideró en primer lugar que el regadío (dotación media = 8.625 m³/ha/año) tiene dos eficiencias hipotéticas del riego del 60 y el 80 %. En segundo lugar, se consideran dos escenarios hipotéticos según los cuales el 90% y el 70% de los excedentes del riego pueden llegar a las superficies de inundación. En definitiva, se contemplan cuatro supuestos susceptibles de incrementar las áreas de máxima inundación de las lagunas. El cálculo de la altura de agua se realizó considerando la cuenca de la laguna como un cono truncado en el que se conocen las superficies entre las curvas de nivel contiguas (planimetradas en las hojas topográficas a escala 1:5.000 del Plan General de Transformación) y los volúmenes de agua capaces de almacenarse entre cada dos curvas de nivel. Se transformó así el volumen de agua procedente del regadío en altura de agua y, a partir de ésta, en la nueva superficie inundada debida al riego.

Finalmente, se ha elaborado el ciclo de llenado y vaciado del agua de las lagunas desde Enero de 1987 a Septiembre de 1990, mediante las observaciones de presencia (código 1) o ausencia de agua (código 0) realizadas la primera semana de cada mes. Aunque se colocaron escalas en las cotas mínimas de cada laguna al objeto de efectuar medidas de altura de la lámina de agua, este procedimiento no resultó satisfactorio debido al desplazamiento imprevisible del agua estancada por efecto del viento frecuente en la zona de estudio. Por ello, las lecturas de escala sólo resultaron fiables cuando la superficie inundada era superior a la mitad del área de máxima inundación.

Balance hídrico

Se ha efectuado un balance hídrico mensual (Enero de 1989 a Octubre de 1990) para el área de inundación de cada laguna, que se ha comparado con las observaciones de campo sobre presencia o ausencia de agua. Aunque estos balances sólo pueden aportar resultados cualitativos, dadas las incertidumbres existentes en las entradas y salidas consideradas, las desviaciones entre estas estimas y los valores de campo observados pueden ser interesantes para tener una primera aproximación acerca de los

órdenes de magnitud de los diferentes componentes del balance.

Dado que entre dichos componentes no se ha considerado el de los aportes laterales de agua provenientes de los acuíferos existentes en la zona de estudio, dichas desviaciones pueden indicar asimismo la importancia relativa de dichos aportes subterráneos en las diferentes lagunas analizadas y su posible funcionamiento como zonas de recarga o descarga.

Las entradas y salidas consideradas en el balance fueron:

a) Entradas: precipitación directa sobre el área de máxima inundación ($P \times AI$) y escorrentías superficial $[(P \times Ce) \times (Ac-AI)]$ y subsuperficial $[(P \times Cs) \times (Ac-AI)]$ en el resto de la cuenca de recepción de la laguna. P es la pluviometría recogida en los pluviómetros instalados, AI es el área de máxima inundación, Ac es el área de la cuenca de recepción, Ce es el coeficiente de escorrentía superficial (o porcentaje de P que llega a AI superficialmente = P') y Cs es el coeficiente de escorrentía subsuperficial (o porcentaje de P que llega a AI subsuperficialmente = P'').

b) Salidas: evaporación directa ($E \times AI$) de la lámina de agua libre. E es la evaporación obtenida en los tanques clase A de Candanos (para las lagunas Amarga 1 y 2) y Valfarta (para el resto de lagunas). Se ha considerado que la E real del agua en las lagunas es 0.8 de la E del tanque, debido al efecto reductor de la salinidad sobre la evaporación.

Se han efectuado cuatro balances que tienen en cuenta cuatro supuestos de entradas de agua a las lagunas:

1. Balance 1. Entradas: precipitación directa + escorrentía superficial + escorrentía subsuperficial:

$$P \times AI + P \times Ce \times (Ac-AI) + P \times Cs \times (Ac-AI) = E \times 0.8 \times AI \quad (23)$$

Se ha considerado como valor de Ce los de 3.7% (obtenido por Beltrán (1989) en los Hoyos Agustín y Benamud), 25, 50 y 90%. Como valores de Cs se consideran el 5 y 15%, valores relativamente bajos debido al carácter árido de la zona de estudio, que hace presuponer que el agua que infiltra en el suelo se pierde en gran medida por evapotranspiración, y del 25 % en balances con Ce del 25% y superiores.

2. Balance 2. Entradas: precipitación directa + escorrentía subsuperficial:

$$P \times AI + P \times Cs \times (Ac-AI) = E \times 0.8 \times AI \quad (24)$$

Se han considerado los valores de Cs del 5% y 15%.

3. Balance 3. Entradas: precipitación directa + escorrentía superficial:

$$P \times AI + P \times Ce \times (Ac-AI) = E \times 0.8 \times AI \quad (25)$$

4. Balance 4. Entradas: precipitación directa:

$$P \times AI = E \times 0.8 \times AI$$

Estos cuatro balances recogen un espectro amplio de posibilidades que van desde la situación más favorable a la presencia de agua en las lagunas (esto es, balance positivo o (entradas - salidas) > 0) correspondiente al Balance 1, hasta la situación de balance más negativo correspondiente al Balance 4.

Hidroquímica

En primer lugar, se ha efectuado una caracterización química de las aguas de entrada (precipitación y aguas subterráneas) a las lagunas. Las aguas de precipitación recogidas en los pluviómetros durante el período 89-90 se analizaron químicamente según los métodos descritos anteriormente. A partir de estos resultados se obtuvo la composición química media de las aguas de entrada a las lagunas vía precipitación. La caracterización química de posibles entradas laterales subterráneas se ha efectuado mediante el análisis químico de las aguas muestreadas en los pozos próximos a las lagunas. Para las lagunas situadas fuera de la cuenca endorreica central (Amarga I y II) se elaboró una composición química media de las aguas subterráneas de su entorno.

En segundo lugar, se han caracterizado químicamente las aguas de las lagunas recogidas durante los años 1987 a 1990. Una vez filtradas, las muestras se analizaron según los métodos descritos anteriormente.

En tercer lugar, se ha analizado químicamente la solución intersticial de los sedimentos de cada laguna. Para ello, se recogieron muestras en el centro de las lagunas a las profundidades de 0-10, 0-30 y 30-60 cm. La solución de la muestra superficial (0-10 cm) se extrajo directamente por vacío, en tanto que la de las muestras de 0-30 y 30-60 cm se obtuvo en extracto de pasta saturada. Posteriormente, el muestreo del sedimento lagunar se sustituyó por la instalación de sondas de succión a 30 y 60 cm de profundidad, obteniéndose "in-situ" las muestras del agua intersticial.

Para el cálculo de actividades iónicas e índices de saturación mineral se utilizó el programa WATEQ4F (Ball et al., 1987). Este programa está basado en la aplicación de la ecuación de Debye-Hückel para el cálculo de actividades de las especies disueltas. En nuestro caso se aplicó a las composiciones iónicas medias (1987-1990) de las aguas libres y a las composiciones iónicas de las aguas libres y a las extraídas del sedimento a 30 y 60 cm en una misma fecha de muestreo (Diciembre 1988). Los resultados obtenidos deben considerarse orientativos, dadas las limitaciones inherentes de WATEQ para soluciones de elevada fuerza iónica.

5.3.4. Río Ebro

Se realizaron cinco muestreos de agua en once puntos del río situados entre Zaragoza y el embalse de Mequinenza (Figura 54). Las fechas de muestreo fueron las siguientes: 7 de Julio de 1987, 14 de Marzo y 13 de Septiembre de 1988, 7 de Julio de 1989 y 1 de Marzo de 1990. La CE, pH y temperatura del agua se midieron "in-situ" y se recogieron 250 ml de agua en cada punto para determinar en el laboratorio los iones mayoritarios. Generalmente, dichos muestreos se efectuaron sobre puentes al objeto de recoger aguas fluyentes superficiales de la parte central del cauce.

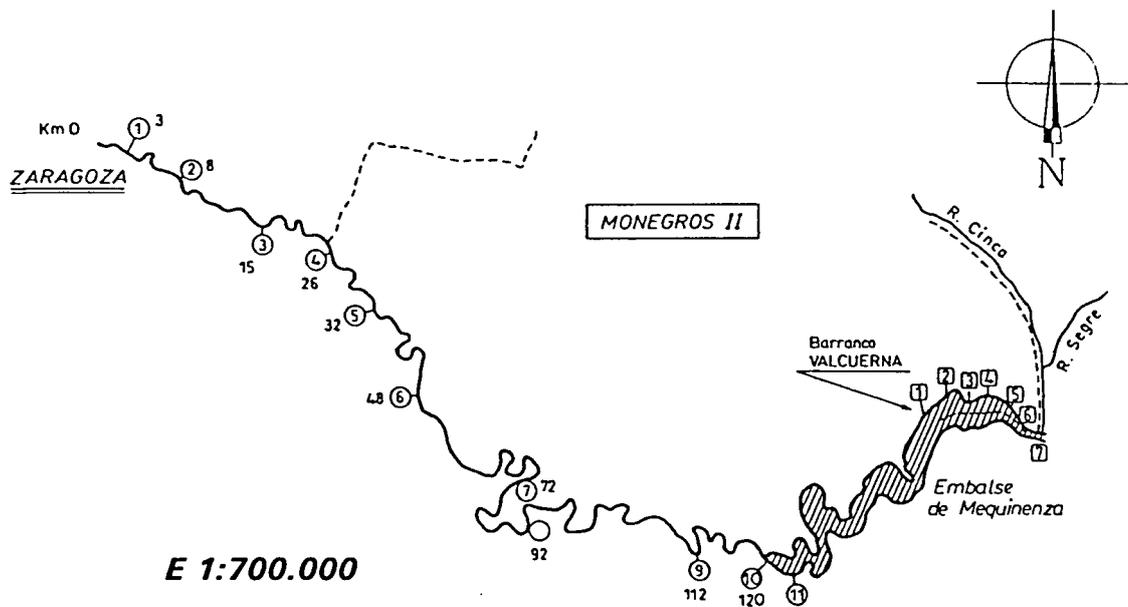


Figura 54. Río Ebro: localización de los puntos de muestreo entre Zaragoza y el embalse de Mequinenza, con su distancia (Km) al punto de origen, y de los puntos de muestreo dentro del embalse de Mequinenza.

El 16 de febrero de 1990 se muestreó el embalse de Mequinenza en seis puntos longitudinales desde la desembocadura del barranco de Valcuerna hasta la misma presa, determinando la CE y temperatura en cada punto a diferentes profundidades del agua. Dicho muestreo se realizó con una sonda de CE y temperatura de la U.P.C. ubicada en una lancha neumática del Comena (DGA), efectuando el recorrido desde la presa hacia la cola del embalse. Limitaciones materiales y de tiempo impidieron efectuar un segundo muestreo programado para el final del verano del mismo año.

5.4. RESULTADOS Y DISCUSION

5.4.1. Descripción física de las cuencas hidrológicas

La descripción de las unidades hidrológicas está centrada en sus características edafológicas, geológicas e hidrológicas, ya que son los aspectos de mayor influencia en el régimen hídrico superficial. La Tabla 50 resume las principales características fisiográficas de las unidades hidrológicas que están representadas en la Figura 48.

Tabla 50. Características fisiográficas de las unidades hidrológicas presentes en el área de estudio.

UNIDADES HIDROLOGICAS	Superf. (Km ²)	Alt.max. (m)	Alt.min. (m)	Longitud (Km)	Pendiente (%)
I-BARRANCO DE VALCUERNA	439	459	121	35.0	1.70
II-VAL DE LIBEROLA	40	400	220	19.2	1.30
III-VAL DE ALORAS	131	390	180	12.5	0.57
IV-BARRANCO DE VALDELACOJA	175	361	125	16.5	0.63
V-VAL DE POBLES	156	364	165	8.3	1.20
VI-VAL DE CENICERA	69	385	161	17.8	1.70
VII- CUENCA ENDORREICA	237	404	316	-	0.05

I - Barranco de Valcuerna.

Se inicia en el extremo SE de la Sierra de Alcubierre y discurre en dirección NO-SE hasta finalizar en el embalse de Mequinenza. Tiene una longitud aproximada de 35 Km y una cuenca de 439 Km². Los tributarios de la margen derecha son poco numerosos pero tienen una gran longitud; ninguno de ellos tiene agua de manera continua. Los de la margen izquierda son más numerosos, tienen menor longitud y se localizan principalmente en la parte media e inferior de la cuenca. Son también cursos temporales.

Geológicamente, el Bco. de Valcuerna se encuentra situado sobre materiales terciarios, predominantemente miocenos, aunque existen al sur de la cuenca litologías de edad oligocena.

El curso fluvial inicia su recorrido en facies calcáreas (Miembro Sigena, según terminología de Quirantes). Hacia el Sur, el eje del cauce constituye el límite entre el Miembro Sigena y el miembro Bujaraloz, pertenecientes ambos a la Formación Alcubierre. A partir de Peñalba el curso empieza a atravesar las facies yesíferas de la Formación Mequinenza, en concreto materiales correspondientes al Miembro Los Arcos.

Litológicamente, en la cabecera predominan las calizas y en el tramo medio, especialmente en la margen derecha (Miembro Bujaraloz), se intercalan con margas y yesos. Dentro del Miembro Los Arcos, que ocupa la mayor extensión de la cuenca, predominan las margas sobre las calizas, y a techo las calizas son algo detríticas. Son

frecuentes las intercalaciones de las margas con capas de yeso de forma lenticular. El miembro Peñalba se halla representado casi exclusivamente en el límite Este de la Cuenca.

La cartografía a escala 1:50.000 permitió subdividir las facies definidas por Quirantes en tramos con características litológicas definidas. En el Miembro Sigena pueden hacerse dos subdivisiones: un tramo eminentemente calcáreo, con algunas margas, y un tramo predominantemente detrítico, lutitas y areniscas con algunas margas. Las diferenciaciones que pueden hacerse en el Miembro Bujaraloz están basadas en la proporción de uno u otro material en la serie estratigráfica. En la zona más próxima al cauce predominan las calizas, mientras que en las zonas más alejadas la serie está formada por alternancias de margas, calizas y yesos. El Miembro Peñalba, al estar muy poco representado en la cuenca, no permite hacer diferenciaciones significativas. Sin embargo, la proporción de lutitas es mucho mayor que en el resto de las formaciones. También son frecuentes las areniscas, lo que permite diferenciarlo del resto de los miembros presentes en el área de estudio. En el Miembro Los Arcos pueden dividirse tres tramos bien diferenciados que se alternan en la serie. Son los denominados M1-4a, en el que las lutitas son la litología diferenciadora, el tramo M1-4y, constituido por alternancia de margas y yesos, y el tramo M1-4m, en el que las calizas alternan con margas y yesos. Todos estos materiales se sitúan sobre materiales oligocenos que aparecen representados en la parte sur de la cuenca, en ambos márgenes. Están constituidos por lutitas, margas, areniscas y yesos. Las calizas no aparecen en la serie y las lutitas y areniscas son las litologías dominantes.

En esta cuenca, el relleno aluvial cuaternario aparece representado en la mayor parte de los tributarios del barranco y se halla muy desarrollado en el cauce principal. La potencia de sedimentos sobrepasa por término medio los tres metros y se han citado potencias de 6.6 m (INTECSA, 1986).

La descripción de los suelos presentes en la cuenca ha sido ya efectuada en el capítulo 3.

II - Val de Liberola.

En el área de estudio se encuentra exclusivamente la margen derecha de esta unidad hidrológica. El fondo del cauce principal y los tributarios están constituidos por un relleno cuaternario de limos entre 1 y 1.5 m. de espesor.

Geológicamente, está situada sobre el Mb. Calizas de Peñalba. Los suelos desarrollados sobre ella tienen una profundidad variable y poca pedregosidad. En el fondo del barranco los suelos son profundos, salinos y presentan capa freática muy próxima a la superficie.

La mayor parte de la cuenca se halla ocupada por cultivos. Únicamente en la zona lindante con el pantano de Mequinenza existe una cubierta vegetal desarrollada.

Aunque no es un curso de agua permanente, su cuenca está drenada, tanto de forma puntual (manantiales) como difusa (existencia de un nivel freático en el fondo del valle muy próximo a la superficie).

III - Val de Aloras.

Dentro de esta unidad hidrológica se ha considerado tanto la cuenca denominada Val de Aloras como un gran número de barrancos de pequeña longitud y gran amplitud, que vierten sus aguas directamente al embalse de Mequinenza. Tanto la val de Aloras como los barrancos citados son cursos temporales de agua cuyos fondos son planos y se hallan cultivados en la actualidad.

La cabecera de la Val de Aloras está completamente cubierta por bosque, lo mismo que los barrancos temporales con los que limita la cuenca principal. La parte media y baja de la Val de Aloras está actualmente con cultivo de cereal y son escasas las zonas con vegetación.

Desde el punto de vista geológico, ocupa el Mb. Bujaraloz y una pequeña extensión dentro de la Fm. Caspe, cerca de la confluencia con el embalse de Mequinenza. Los suelos desarrollados sobre estos materiales son poco profundos y pedregosos.

IV - Barranco de Valdelacoja.

Esta unidad constituye una cuenca muy amplia que se inicia en las proximidades de la mayor concentración de lagunas del área. Por la margen izquierda se une, en su cabecera, el Barranco de Valdefrancín, que tiene su inicio entre las lagunas de la Playa y de Guallar. La cuenca está atravesada por cursos de gran longitud y débil encajamiento en los materiales miocenos (Fm. Alcubierre-Fm. Caspe). En la confluencia con el embalse de Mequinenza se han cartografiado materiales oligocenos.

En la parte occidental de la cuenca existen algunos barrancos de corta longitud que vierten al Embalse de Mequinenza. Todos los cauces citados son cursos temporales cuyos fondos están ocupados por cultivos. En el tiempo analizado (período 1986-1990) ninguno de ellos ha tenido agua. Tras los episodios tormentosos de la época veraniega, la mayoría de ellos presentan indicios de gran escorrentía.

V - Val de Pobles.

La Val de Pobles ocupa la parte central de la unidad hidrológica V. Está constituida por la val que le da nombre, la Val del Lugar, la Val de Zaborros y un gran número de pequeños barrancos de dirección norte-sur.

La mayoría de los cursos se inician en el borde septentrional de la Plana Bujaraloz-Sástago. Las cabeceras se presentan muy encajadas en los materiales miocenos y pasan en la parte media y baja a una zona de pendientes suaves.

El centro de las vales está en cultivo y las laderas están ocupadas por bosques de pino y sabina de poca densidad. La mayor parte de los suelos son esqueléticos, aunque existen suelos algo más profundos pero muy pedregosos y con contenido escaso en materia orgánica.

VI - Val de Cenicera.

Sólo se ha considerado dentro del área de estudio la margen izquierda de esta cuenca. Es una cuenca de gran amplitud que se inicia en las proximidades de la máxima altitud del área (Purburell, cota 400 m). Se trata de un curso temporal en el que anualmente se ha producido flujo de agua durante determinados períodos.

Constituye el drenaje más occidental del área de estudio y el único que se ha mostrado efectivo temporalmente durante el período estudiado, a excepción del Barranco de Valcuerna. Discurre sobre el Mb. Yesos de Retuerta y su fondo está ocupado mayoritariamente por limos (cuaternario aluvial). La cabecera de la cuenca está ocupada por un sabinar poco denso. La parte media está ocupada mayoritariamente por cultivos agrícolas de secano y la parte baja por pinar.

El hecho de estar situada sobre una formación yesífera permite suponer la aportación de una cantidad elevada de sales asociada a los caudales.

VII - Cuenca Endorreica Central.

Será objeto de una descripción más detallada posteriormente, a pesar de lo cual cabe decir que alberga gran cantidad de cubetas endorreicas que dan al paisaje un aspecto característico dentro de un relieve muy ondulado. Su pendiente media es muy baja y después de Valcuerna es la unidad de mayor extensión. Se halla dentro de la Formación de Alcubierre (Miembro Bujaraloz).

Dejando aparte la cuenca endorreica central y el Barranco de Valcuerna, cuyas características son objeto de un análisis más detallado, el interés del estudio de las unidades hidrológicas se centra en su papel drenante y en su participación en el balance hídrico global. Excepto el Barranco de Valdecenicera, ninguno de los barrancos incluidos en las unidades hidrológicas ha tenido caudal circulante en el período 1986-1990.

Las descripciones del medio físico de las unidades hidrológicas del área de estudio ponen de manifiesto que existen importantes diferencias entre las unidades y destacan la incidencia que determinadas características pueden tener en el régimen hidrológico superficial y, consecuentemente, en el balance hídrico global del sistema.

Estimación de las aportaciones superficiales de las unidades hidrológicas.

En la Tabla 51 figuran las aportaciones superficiales anuales estimadas en las siete unidades hidrológicas para la precipitación del año medio y el valor medio de los dos coeficientes de escorrentía C_{e1} y C_{e2} , calculados en un apartado posterior. Las aportaciones máximas corresponden a la unidad I con $0.125 \text{ Hm}^3/\text{año}$ y las mínimas a la unidad II con $0.011 \text{ Hm}^3/\text{año}$. La aportación superficial del año medio calculada para la cuenca de la E.A. nº 231 es de $0.067 \text{ Hm}^3/\text{año}$, equivalente a 2.15 L/s , y la del año 1986 ($P = 390 \text{ mm}$) es de $0.0739 \text{ Hm}^3/\text{año}$, equivalente a 2.34 L/s .

Desde el punto de vista de la escorrentía, las observaciones realizadas durante y después de las tormentas (estado de los campos, caminos, lagunas y balsas) permiten

apreciar una gran variabilidad entre cuencas, justificada por las diferentes características del relieve, cubierta vegetal y tipo y profundidad del suelo. El mayor porcentaje de escorrentía observado corresponde al barranco de Valcuerna y en esta unidad hidrológica también han sido cuantificadas las mayores aportaciones superficiales. Ciertas zonas dentro de la cuenca endorreica central (especialmente la parte más occidental) han presentado asimismo escorrentías importantes en episodios tormentosos.

La única unidad hidrológica en la que es posible contrastar la fiabilidad de estas estimaciones es el Bco. de Valcuerna, para el que se dispone de registros continuos del caudal en la E.A. nº 231. Las aportaciones totales medidas en la estación de aforos (0.38 Hm³/año o 12.0 L/s en régimen natural, año 1986) son cinco veces superiores a las aportaciones debidas a la precipitación (2.34 L/s). Si se aceptan dichas estimas, ello indicaría que el 82% de la aportación total tiene fundamentalmente un origen subterráneo, lo que sugiere que la contribución del acuífero es relevante en el sistema en consideración. Sin embargo, debe resaltarse que dichas estimas son cuestionables, ya que la medida de la precipitación en tan sólo dos estaciones pluviométricas puede no ser representativa de la lluvia caída en toda la cuenca de recepción, especialmente en situaciones de régimen tormentoso de carácter muy direccional, frecuentes en el área de estudio.

Tabla 51. Precipitación del año medio y aportaciones superficiales (Ap) calculadas con el valor medio de Ce_1 y Ce_2 ($Ce=0.080$ %), de las unidades hidrológicas del área de estudio.

UNIDADES HIDROLOGICAS	P (mm/año)	Ap (Hm ³ /año)
I - BARRANCO DE VALCUERNA	358	0.125
II - VAL DE LIBEROLA	358	0.011
III - VAL DE ALORAS	298	0.031
IV - BARRANCO DE VALDELACOJA	298	0.041
V - VAL DE POBLES	305	0.038
VI - VAL DE CENICERA	354	0.019
VII - CUENCA ENDORREICA	355	0.067

5.4.2. Barranco de Valcuerna

Estación de aforos y calidad del agua

Tal como se describió en la introducción de este capítulo, el objetivo fundamental de estas medidas fue estimar el volumen de agua y la salinidad y masa de sales exportadas por el barranco en la E.A. n° 231.

En el Anexo 4 se presentan, para los cinco años estudiados, el calado medio diario deducido del limnigrama y el caudal correspondiente estimado con las curvas de gasto presentadas en el capítulo 5.3. Si se analizan los caudales diarios de 1986 se aprecia, hacia la segunda mitad del año, la existencia de períodos más o menos largos con caudales relativamente elevados, debido a la realización de pruebas de estanqueidad y desagüe del Túnel de Alcubierre. Puede por lo tanto concluirse que, a partir de la segunda quincena de Septiembre de 1986, esta unidad hidrológica está afectada en mayor o menor medida por las aguas del Canal de Monegros.

En régimen natural (1 de Enero a 15 de Septiembre) el caudal máximo medio diario registrado fue de 1.963 L/s (18 de Junio) y el mínimo de 6 L/s (7 al 17 de Junio; 27 de Julio al 3 de Agosto y del 14 al 25 de Agosto) (Tabla 52). Los caudales elevados correspondieron a episodios tormentosos, cuya existencia fue confirmada al comprobar los registros de las estaciones climáticas de Peñalba y/o Candanos. Los caudales mínimos se dieron en los meses de verano y durante períodos relativamente largos por lo que, tanto en volumen como en salinidad (CE), pueden considerarse representativos de las características del caudal de base de esta unidad hidrológica.

A partir del 18 de Septiembre de 1986 se empezaron a producir desagües al barranco provenientes del Canal de Monegros a través de la boca Sur del Túnel de Alcubierre. Ello supuso una alteración importante del régimen natural, tal como se observa en la Tabla 52 para los caudales medios anuales y en la Figura 55 para los caudales medios mensuales.

La falta de datos durante algunos períodos de riego es la causa del descenso aparente del caudal medio de algunos años (Año 1988). En realidad, el volumen anual desaguado por el Canal de Monegros ha crecido paulatinamente como consecuencia del incremento de las superficies regadas.

Parte de la variabilidad temporal que se refleja en la Tabla 52 y Figura 55 se debe a la heterogeneidad en el uso del agua por los regantes y a que el barranco es asimismo receptor de los flujos de retorno del riego. La transformación en regadío ha supuesto en líneas generales que la aportación anual del cauce de Valcuerna sea entre 3 y 15 veces mayor que la del régimen natural (Tabla 52 e histograma de frecuencias en la Figura 56) y que los coeficientes de variación de los valores medios aumenten en órdenes de magnitud respecto al obtenido en régimen natural.

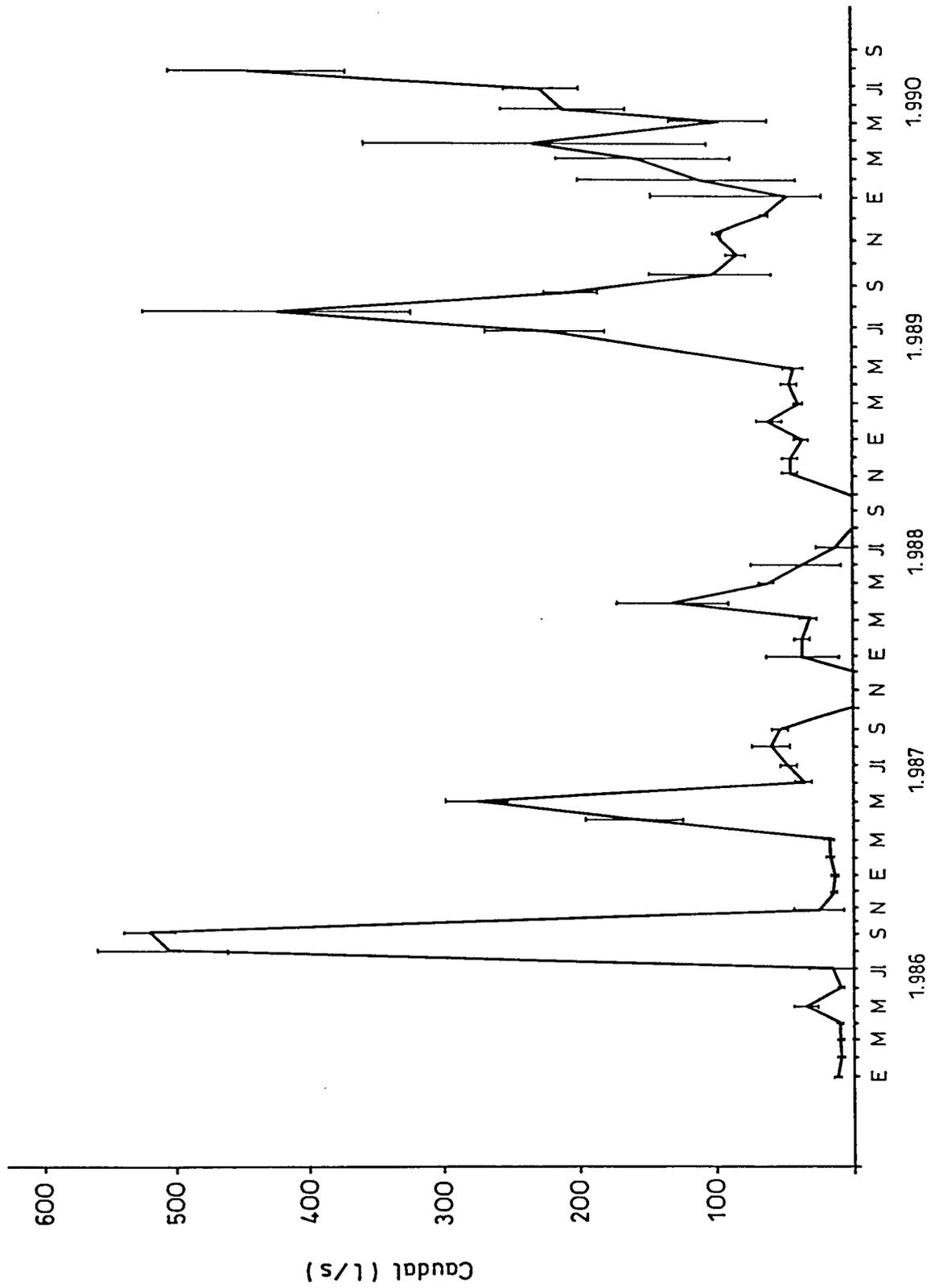


Figura 55. Valores medios mensuales de caudal (L/s) y desviación estándar de los mismos para el período 1986 - 1990.

Tabla 52. Caudales máximos y mínimos diarios, caudal medio anual con su desviación estandar (σ_{n-1}) y coeficiente de variación (CV %) y aportación anual en la estación de aforos nº 231 durante el período Enero de 1986 a Septiembre de 1990.

	REGIMEN NATURAL	1986	1987	1988	1989	1990
$Q_{\text{diario}}(\text{m}^3/\text{s})$						
Max	1.963	1.963	0.660	0.452	4.784	7.639
min	0.006	0.006	0.014	0.021	0.021	0.047
$Q_{\text{medio an.}}(\text{m}^3/\text{s})$	0.012	0.097	0.076 ⁽¹⁾	0.038 ⁽²⁾	0.117 ⁽³⁾	0.178
σ_{n-1}	0.008	0.41	1.35	0.45	3.16	4.62
CV %	66	422	1776	1184	2700	2595
Aportación anual (Hm^3)	0.38	3.06	2.39	1.20	3.69	5.61

⁽¹⁾ Media de Enero a Septiembre.

⁽²⁾ Media de todos los meses excepto el período 13/7 a 2/11.

⁽³⁾ Media de todos los meses excepto Junio.

De la Tabla 52 se deduce que el caudal medio anual en régimen natural es de 12.0 L/s. Si se acepta que la escorrentía subterránea es semejante al caudal mínimo obtenido de 6 L/s, a los retornos urbanos y agroindustriales y a las escorrentías superficial e hipodérmica correspondería un caudal medio de unos 6 L/s. La estima efectuada anteriormente respecto a la escorrentía superficial ha sido de 2.34 L/s, lo que implica que los retornos y escorrentía hipodérmica ascienden a unos 3.66 L/s, cifra razonable si se tiene en cuenta que los retornos medios de Peñalba pueden estimarse en unos 2 L/s. Puede, por lo tanto, concluirse que las magnitudes de este balance aproximado son sustancialmente coherentes.

Los valores de la aportación superficial del Barranco de Valcuerna estimados por otros autores (MOPU-CSIC, 1989) están altamente sobreestimados, ya que presentan unos coeficientes de escorrentía en torno al 6% y unas aportaciones superficiales anuales de 9.7 $\text{Hm}^3/\text{año}$, es decir, veintiséis veces superiores a las medidas en régimen natural. Parece evidente por lo tanto que los valores reales del coeficiente de escorrentía, dentro del rango de variabilidad espacial y temporal confirmado por observaciones de campo, se aproximan más a los obtenidos en este trabajo que a los deducidos en el trabajo del MOPU-CSIC (1989).

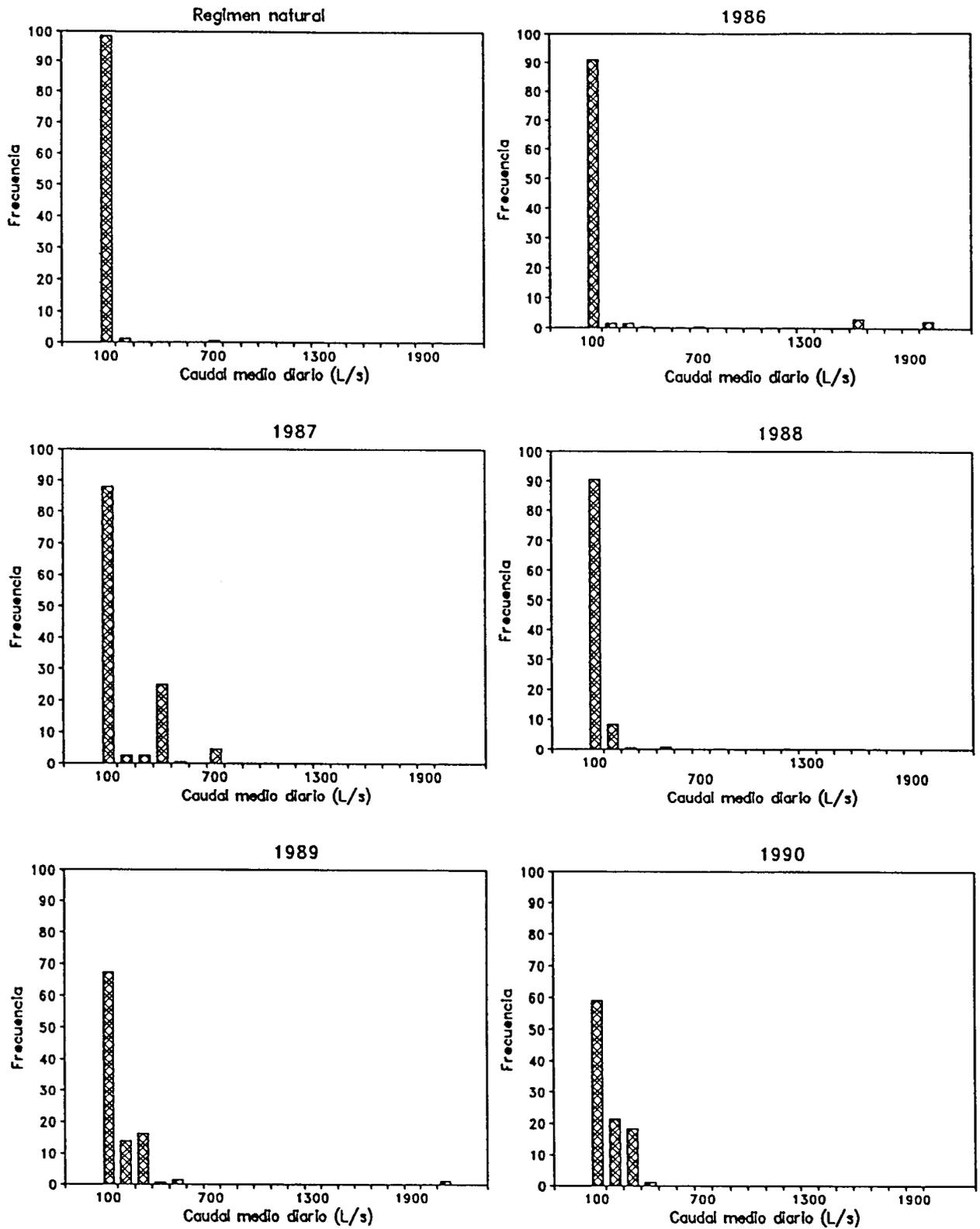


Figura 56. Barranco de Valcuerna: Histograma de frecuencias del caudal (L/s) registrado en la E.A. n° 231 en régimen natural y en el periodo 1986-1990.

Respecto a la salinidad de las aguas, en el Anexo 5 se presenta la CE media diaria medida en las muestras de agua recogidas por el muestreador automático. En la Tabla 53 se presenta la CE diaria máxima y mínima obtenida en cada período y la CE media anual con su desviación estándar y coeficiente de variación (período Enero de 1986 a Septiembre de 1990); en la Figura 57 se presentan los valores medios mensuales de CE y en la Figura 58 la distribución de frecuencias de CE para los seis períodos analizados (régimen natural y años 1986 a 1990).

Tabla 53. Conductividad eléctrica diaria máxima y mínima, y conductividad eléctrica media anual con su desviación estándar (σ_{n-1}) y coeficiente de variación (CV %). Período Enero de 1986 a Septiembre de 1990.

	REGIMEN NATURAL	1986	1987	1988	1989	1990
CE_{diaria} (dS/m)						
Max	14.03	14.03	14.00	13.01	11.35	9.75
min	4.86	3.90	1.17	2.33	2.86	1.72
CE_{media an.} (dS/m)	13.28 (1)	12.85 (2)	10.10 (3)	10.73 (4)	8.38 (5)	6.73 (6)
σ_{n-1}	1.26	2.11	3.18	1.90	2.38	2.47
CV %	9	16	31	18	28	37

(1) Media del 24 de Febrero al 15 de Septiembre.

(2) Media del 24 de Febrero al 31 de Diciembre.

(3) Media de todos los meses excepto Septiembre y Octubre.

(4) Media de todos los meses excepto los 11 primeros días de Enero.

(5) Media de todos los meses excepto Diciembre y el período 6/6 al 30/6.

(6) Media de todos los meses excepto de Febrero a Mayo y el período 9/7 a 31/8.

Pueden observarse en esta Tabla los elevados valores de CE para el régimen natural del Barranco y los descensos sistemáticos posteriores debidos a la paulatina extensión del regadío y consiguientes incrementos en los aportes de agua dulce provenientes del Canal de Monegros (CE < 0.3 dS/m). Así, los valores de CE mínimos coinciden generalmente con los mayores desagües del Canal de Monegros, mientras que los máximos coinciden con los caudales mínimos. Estos valores máximos se producen generalmente después de períodos sin precipitaciones, por lo que reflejan la calidad química del caudal de base, que está constituido fundamentalmente por aguas subterráneas.

Los valores medios mensuales descienden de forma importante desde el inicio del período de seguimiento (Figura 57), todavía en régimen natural, hasta el final en Septiembre de 1990. El descenso es paulatino y va asociado a un incremento en el coeficiente de variación.

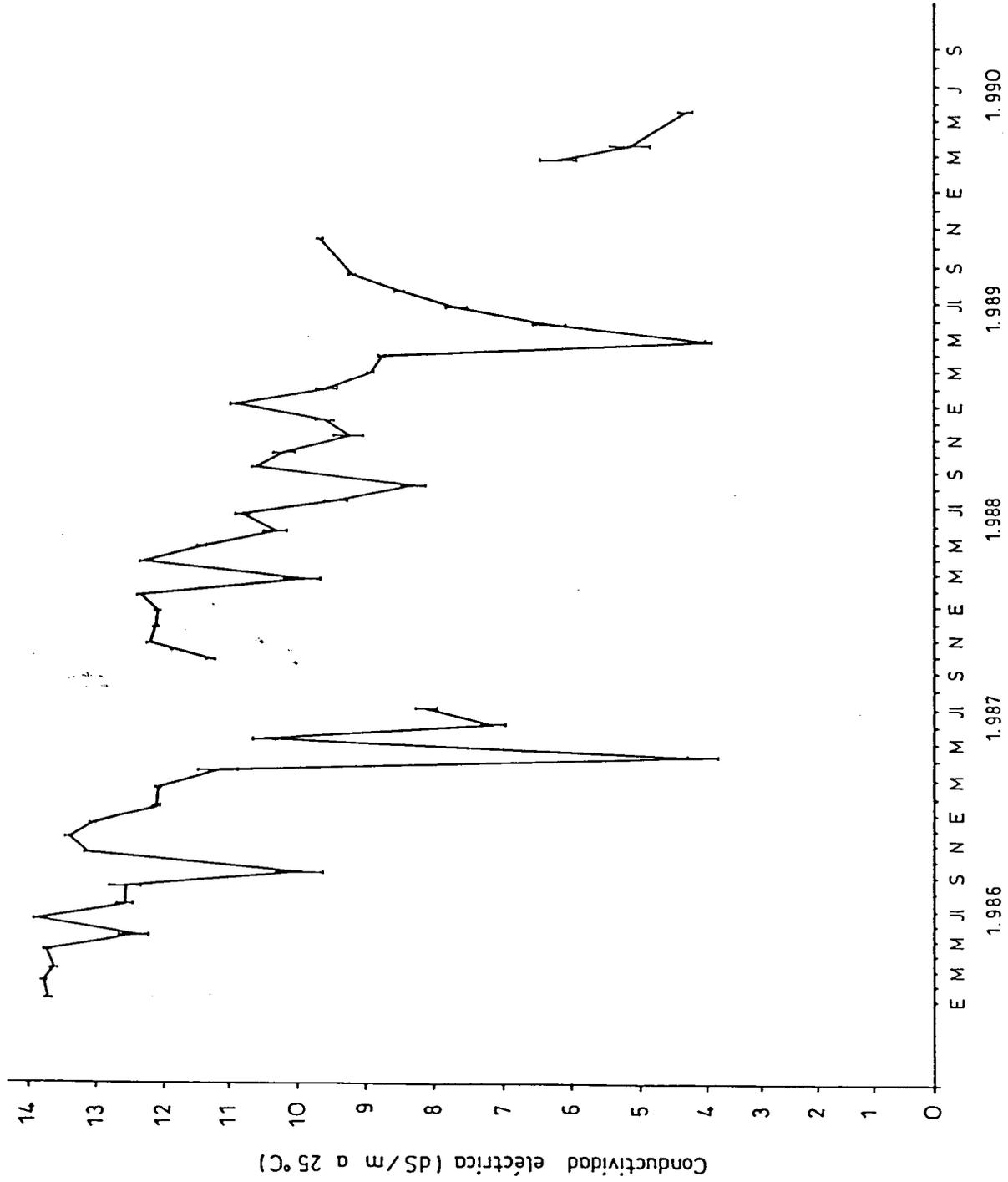


Figura 57. Valores medios mensuales de conductividad eléctrica (dS/m a 25°C) y desviación estándar de las aguas recogidas con el M.A. en la estación de afloros n° 231 durante el período 1986-1990.

El año 1988 constituye una excepción, ya que se incrementa la CE media mensual y disminuye el CV, lo que está de acuerdo con su caudal medio menor y menos variable (Tabla 52). Sin embargo, en el caudal medio del año 1988 faltan los datos de Julio a Noviembre, período que cubre al menos la mitad de la época de riego, que es cuando se producen mayores desagües del Canal, lo que hace que el caudal esté infravalorado, mientras que la serie de datos de CE está prácticamente completa.

Los valores de CE del agua en régimen natural son elevados y relativamente constantes, pero la transformación en regadío a partir del 18 de Septiembre de 1986 origina un descenso considerable en la CE y una mayor variabilidad anual e interanual (Figura 58). El inicio del regadío el 26 de Abril de 1987 supuso un descenso generalizado y continuo de la CE del agua, que ya se había iniciado de forma intermitente en 1986. El descenso de las medias mensuales a partir de esta fecha muestra la influencia del agua del Canal ya mencionada.

Respecto a la composición iónica de las aguas (Anexo 6) y su evolución con el caudal del barranco, la Figura 59 indica que el efecto de las aguas del canal de Monegros es relativamente poco importante, debido a su baja CE. Así, mientras que el orden relativo de los cationes en el agua del canal es $Ca > Mg > Na$, las aguas muestreadas en la estación N° 231 muestran el orden inverso ($Na > Mg > Ca$), que es sistemático e independiente del caudal en el barranco. Análogamente, el orden para los aniones es $SO_4 > Cl > HCO_3$ a pesar de que en las aguas del canal es $HCO_3 > SO_4 > Cl$. Todo ello es consecuencia de la elevada CE y de la preponderancia de los iones Na, SO_4 y Cl en las aguas de aporte subterráneo al barranco, que vienen reflejadas por el diagrama de barras para el caudal de 14 L/s en la Figura 59.

Finalmente, en dicha Figura se aprecia asimismo el descenso de la CE con el incremento del caudal (con la excepción para $Q = 100$ L/s). Así, la relación entre CE y caudal del período 1986-1990 viene tipificada por las ecuaciones descritas en la Tabla 54.

Tabla 54. Ecuaciones de regresión entre la CE (dS/m) y el caudal Q (L/s) para los datos medios (D.M.) mensuales del período 1986-1990, para el régimen natural (R.N.) y para las observaciones diarias de cada año hidrológico en la estación de aforos n° 231.

CE = f(Q)	D.M.	R.N.	1986	1987	1988	1989	1990
Ajuste n =	M 41	M 203	M 310	M 242	R 241	M 303	R 98
a	3.24*	3.03*	2.86*	3.71*	0.06	3.43*	0.10
b	-0.250	-0.203	-0.121	-0.430	0.0006	-0.313	0.005
R ²	0.69	0.54	0.34	0.72	0.54	0.46	0.23

* Log a.; Ajuste: M: $Y = aX^b$; R: $1/Y = a + bX$

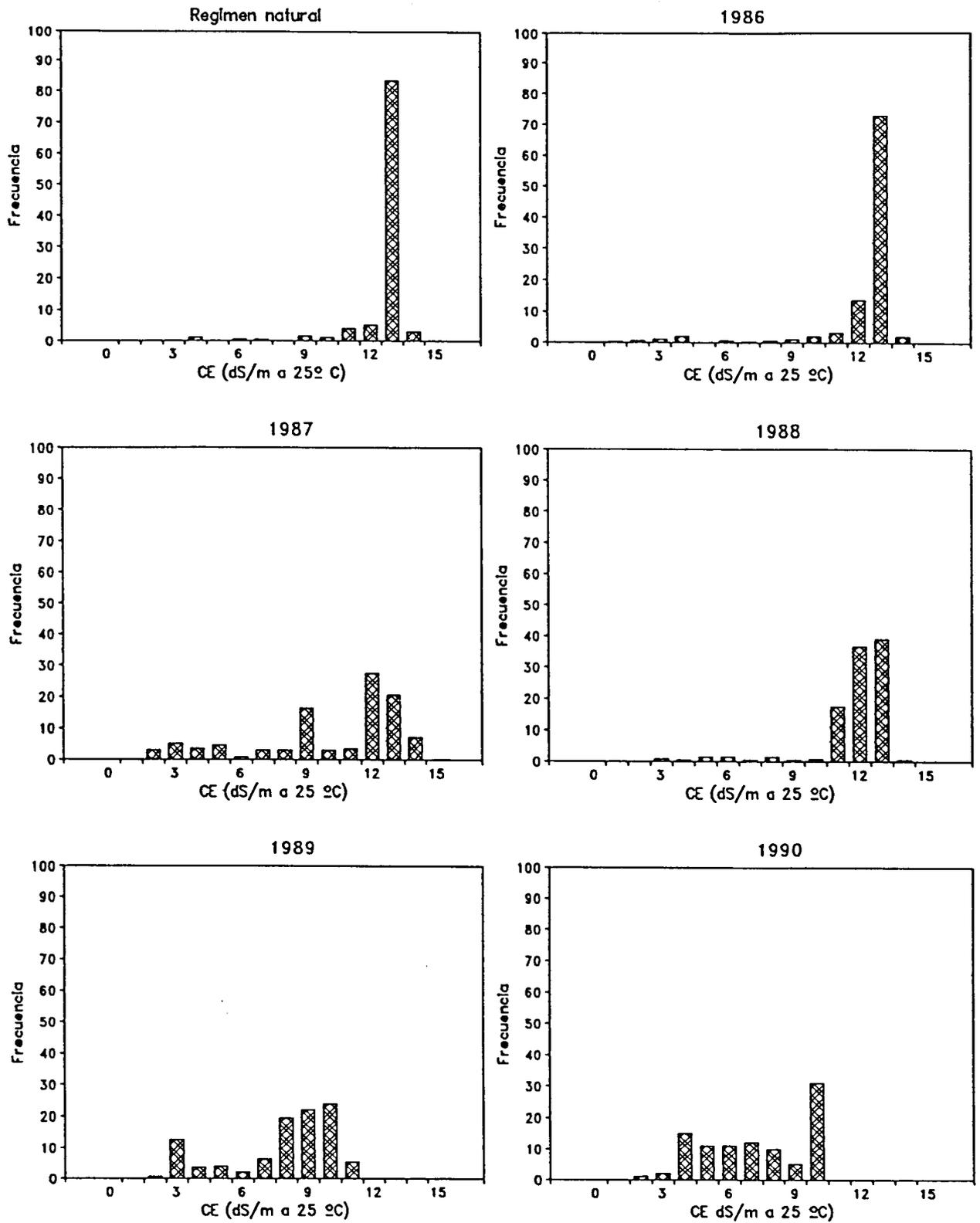


Figura 58. Barranco de Valcuerna: Histograma de frecuencias de la conductividad eléctrica (CE, dS/m a 25 °C) registrada en la E.A. nº 231.

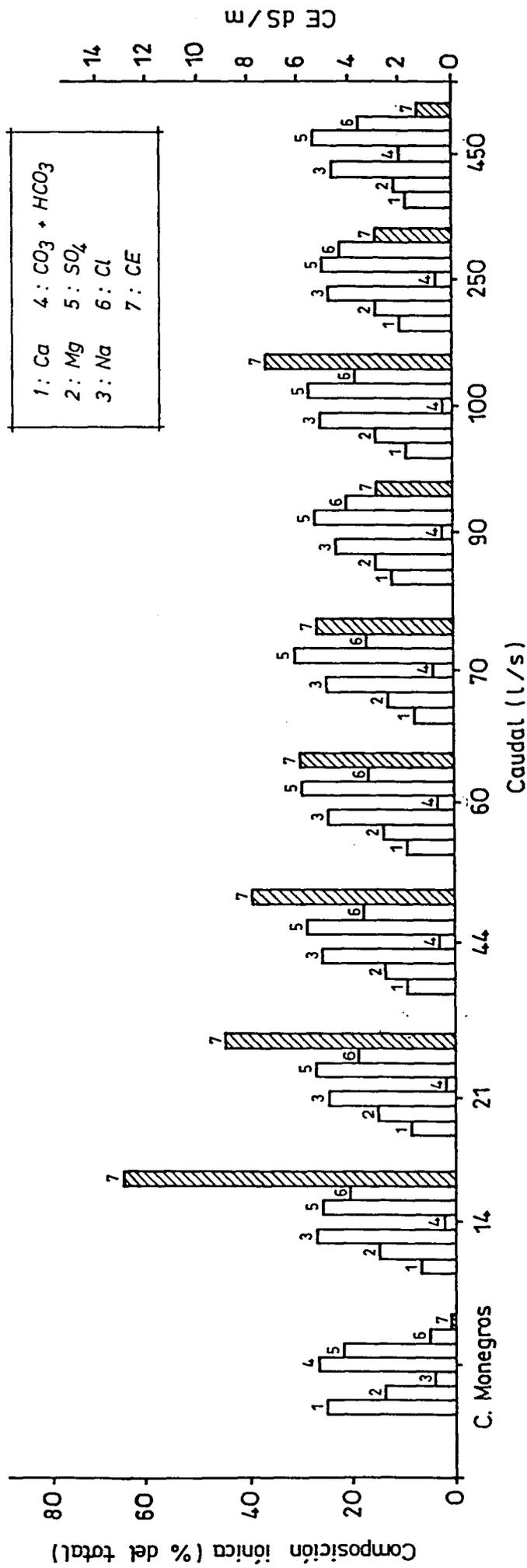


Figura 59. Barranco de Valcuerna: conductividad eléctrica (CE, dS/m) y composición iónica (en % del total en meq/L) del agua del Canal de Monegros y de las aguas en la E.A. nº 231 para diferentes caudales circulantes.

A pesar de que todas las regresiones son significativas al 0.1%, debido al elevado número de observaciones comprendido en los análisis, la Fig. 60 indica que la asimetría en las distribuciones del caudal y CE (Figuras 56 y 58) juega asimismo un papel importante. Así, los histogramas de frecuencias de los caudales anuales (1986-1990) presentan una clara asimetría hacia la izquierda con predominio de valores menores de 200 L/s y los histogramas de frecuencias de las CE anuales del mismo período presentan una asimetría hacia la derecha con predominio de valores por encima de 6 dS/m. En régimen natural, la relación caudal-CE está poco definida ya que los caudales y las CE son poco variables. Para el período 87-90, los caudales registrados tienen una componente importante de agua del Canal, cuyos aportes tienen lugar durante el día y en períodos máximos de ocho horas. Cuando la aportación del Canal es importante ($Q > 500$ L/s), la relación con la CE es inversa y se verifica en todas las series de datos analizadas. Por debajo de estos aportes las relaciones están menos definidas, ya que valores elevados del caudal no se corresponden siempre con CE bajas.

Dichas indefiniciones podrían atribuirse en parte a (1) que el muestreo de agua para la determinación de la CE se lleva a cabo cada doce horas, período que puede no ser coincidente con el pico del hidrograma originado por el desagüe del Canal, ya que éste tiene lugar siempre durante el día y con una duración máxima de ocho horas; (2) la perturbación ocasionada por el regadío en la cuenca del barranco y (3) la existencia de vertidos puntuales procedentes de granjas y núcleos urbanos próximos.

De cualquier forma, los descensos de CE con los incrementos de caudal son, en general, sustancialmente inferiores a los que se esperarían de un simple proceso de dilución con las aguas dulces del canal de Monegros. Ello implica que existe, al menos conceptualmente, una fuente de sales en el sistema que tampona con mayor o menor eficacia el efecto diluidor de las aguas del canal. Este hecho puede observarse en la Figura 59, donde los descensos de CE con el incremento del caudal (al menos en el intervalo entre 20 y 100 L/s), aunque evidentes, no son tan importantes como cabría esperar de su dilución con el agua del canal.

Cálculo de los componentes del hidrograma

En la figura 61 se presenta el hidrograma correspondiente a los caudales registrados en la E.A. nº 231 durante el período del 18 de Junio al 3 de Agosto de 1986. El hidrograma está formado por tres tramos que representan, a priori, las componentes superficial, hipodérmica y subterránea. La descomposición del hidrograma por el método de Barnes se basa en que la liberación de agua subterránea responde a la ecuación $Q = Q_0 \times e^{-\alpha t}$, por lo que la representación gráfica de la misma en escala semilogarítmica ($\ln Q = \ln Q_0 - \alpha t$ (26)) es una recta cuya pendiente es el coeficiente de agotamiento de la descarga subterránea.

Como se explicó en el capítulo 5.3, la descomposición del hidrograma se realiza separando en primer lugar la escorrentía subterránea, ajustando una recta al tramo final del hidrograma. A la escorrentía subterránea le ha correspondido la ecuación

$$\ln Q = 2.24 - 0.01263 t \quad (27)$$

El coeficiente de agotamiento (0.012) indica un tiempo de respuesta del acuífero bastante elevado y un valor de la descarga subterránea (esto es, Q para $t = 0$) de 9.4 L/s. Este valor es algo superior al caudal mínimo obtenido en régimen natural (6 L/s) que podía considerarse como representativo del caudal base del Bco. de Valcuerna y por lo tanto constituido exclusivamente por la descarga subterránea más los retornos urbanos

y de granjas. De cualquier forma, ambas cifras son del mismo orden de magnitud y sugieren que el aporte neto en el tramo estudiado es de unos 6 a 9 L/s. A estas cifras habría que restarles los retornos urbanos y de granjas, cifrados en unos 2 L/s, lo que arrojaría unos valores finales de aportes subterráneos en torno a 4-7 L/s.

Una vez descontado el volumen de agua correspondiente a la descarga subterránea, el hidrograma representa la suma de las descargas hipodérmica y superficial. Puede aceptarse que el segundo tramo del hidrograma corresponde a la descarga hipodérmica, ya que la falta de permeabilidad de los suelos y materiales litológicos podría explicar un tiempo de respuesta tan largo (9 días) como el mostrado en el hidrograma. Sin embargo, este tramo podría corresponder también a una descarga subterránea de régimen y procedencia diferentes a la del tramo 1. En este caso, la recta ajustada a este tramo sería:

$$\ln Q = 0.599 - 0.047 t \quad (28)$$

cuya ecuación indica que el valor de esta posible descarga subterránea es de 1.82 L/s. Su coeficiente de agotamiento (0.047) indica un tiempo de respuesta largo, aunque menor que el de la descarga subterránea principal.

Este planteamiento contemplaría que el Barranco de Valcuerna constituye el nivel de base tanto de acuíferos miocenos (tiempo de respuesta largo y caudales mayores), como de acuíferos aluviales desarrollados en los rellenos cuaternarios del propio barranco y vales adyacentes (mayor permeabilidad, tiempo de respuesta menor y menores caudales).

Por el contrario, si se acepta que únicamente el tramo 1 es representativo de la descarga subterránea, debería concluirse que el Barranco de Valcuerna constituye el nivel base de un único sistema, caracterizado por la ecuación (27) y que el tramo (2) representa la escorrentía hipodérmica. Existe además la posibilidad de que el barranco no drene materiales miocenos y el ajuste del tramo 1 corresponda exclusivamente al acuífero aluvial, dejando el tramo 2 para la escorrentía hipodérmica. Sin embargo, esta última hipótesis es poco probable, dada la elevada salinidad de las aguas subterráneas, más probable en acuíferos miocenos que en acuíferos aluviales cuaternarios. Al margen del origen hipodérmico o subterráneo del tramo 2, su magnitud es poco importante en relación a la descarga subterránea principal representada por el tramo 1 del hidrograma.

Una vez descontado del hidrograma el volumen de agua correspondiente a las descargas hipodérmica y subterránea, el volumen de agua resultante está constituido exclusivamente por la escorrentía superficial, a partir de la cual puede efectuarse el cálculo del coeficiente de escorrentía. Así, a partir del calado medido en la estación de aforos (Figura 62) y de las curvas de gasto presentadas en "Material y Metodos", se obtiene la evolución del caudal representado en la Figura 63, cuya planimetración, previa sustracción de la escorrentía subterránea, arroja un volumen total de escorrentía superficial (Vesc) de 22.775 m³.

El volumen total de lluvia caída en la cuenca de recepción (237 Km² de superficie) de la estación es:

$$V_{lluvia} = (70.5 \text{ L/m}^2) \times (237 \times 10^6 \text{ m}^2) \times (0.001 \text{ m}^3/\text{L}) = 16.7 \times 10^6 \text{ m}^3 \quad (29)$$

Por lo tanto, el coeficiente de escorrentía superficial (Ce, en %) es:

$$Ce = (V_{esc}/V_{lluvia}) \times 100 = 0.136 \% \quad (30)$$

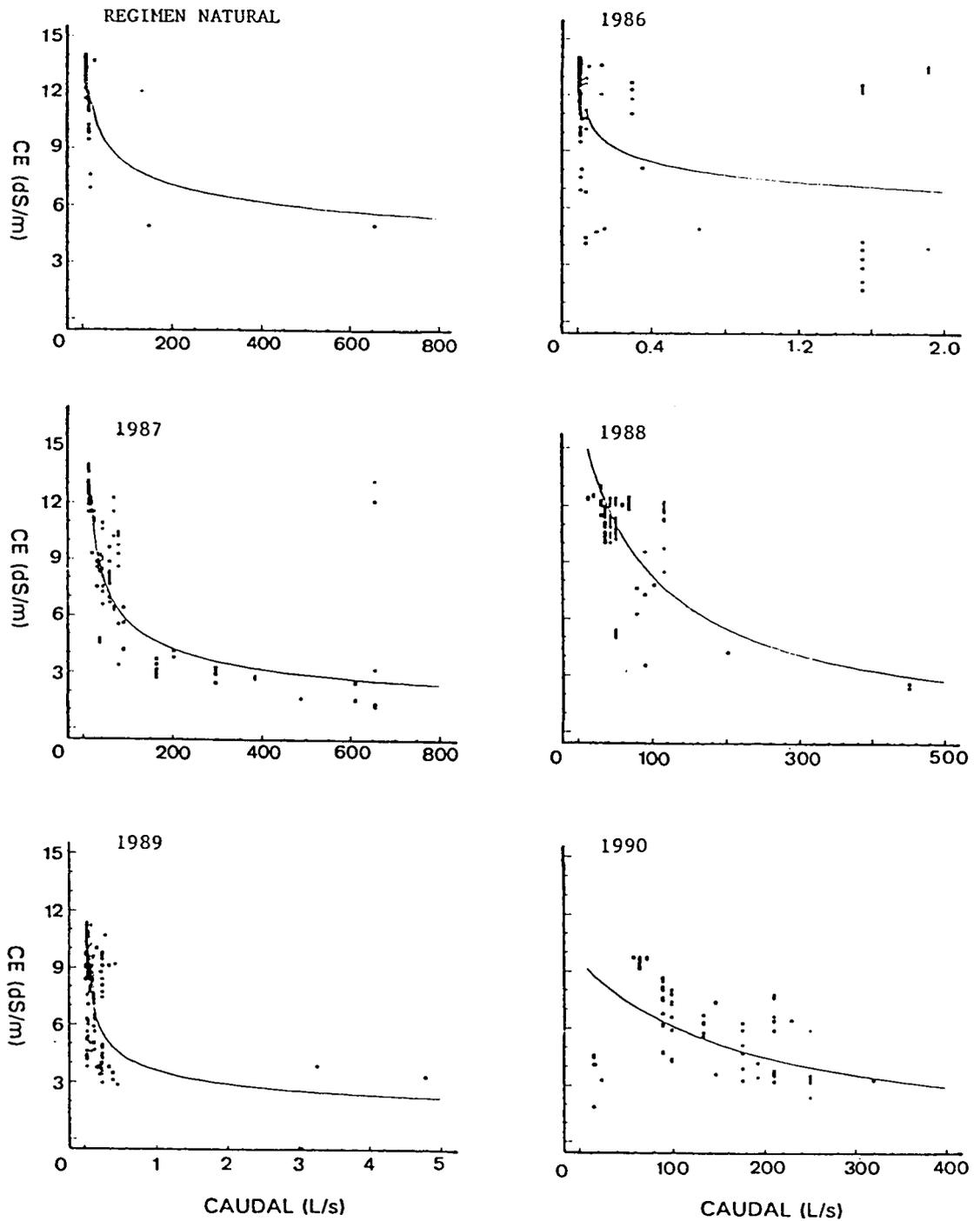


Figura 60. Barranco de Valcuerna: relaciones caudal (L/s) - CE (dS/m) en régimen natural para los años 1986 a 1990.

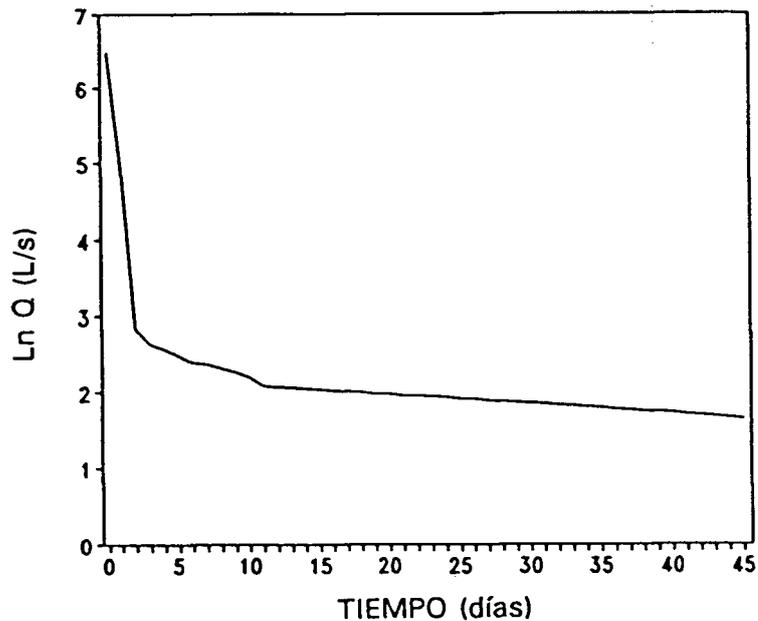


Figura 61. Curva de agotamiento de la descarga subterránea del barranco de Valcuerna para el período de 18 de Junio a 3 de Agosto de 1986.

Operando de forma similar para el resto de precipitaciones con valores superiores a 10 mm, se obtienen los valores de C_e que se presentan en la Tabla 55. Dichos valores han oscilado entre el 0.002% para precipitaciones de 33 y 35 mm y el 0.049% para la precipitación de 40 mm, con un valor medio de 0.025% para el conjunto de observaciones efectuadas. Se aprecia por tanto que los valores de C_e obtenidos por los dos procedimientos ($C_{e1} = 0.136\%$ y $C_{e2} = 0.025\%$) son extremadamente bajos y similares a los deducidos por Beltrán (1989).

Ya se ha comentado anteriormente que estos valores de C_e están sujetos a la incertidumbre derivada de la extrapolación a toda la cuenca de recepción de los valores de precipitación medidos en tan sólo dos estaciones pluviométricas. Aun así, los C_e aparentemente tan bajos son conceptualmente coherentes si se tiene en cuenta el clima árido de la zona, que sugiere que la mayor parte de la lluvia caída es evapotranspirada y el resto queda almacenada en el suelo o recarga al acuífero. Este hecho estaría de acuerdo con la práctica ausencia de cauces de agua más o menos permanentes en la zona de estudio, aunque en contradicción con observaciones de campo y situaciones puntuales en las que a unas precipitaciones intensas correspondieron arroyadas de gran intensidad y de efectos desastrosos para el terreno, los cultivos y la infraestructura de riego, especialmente en el barranco de Valcuerna.

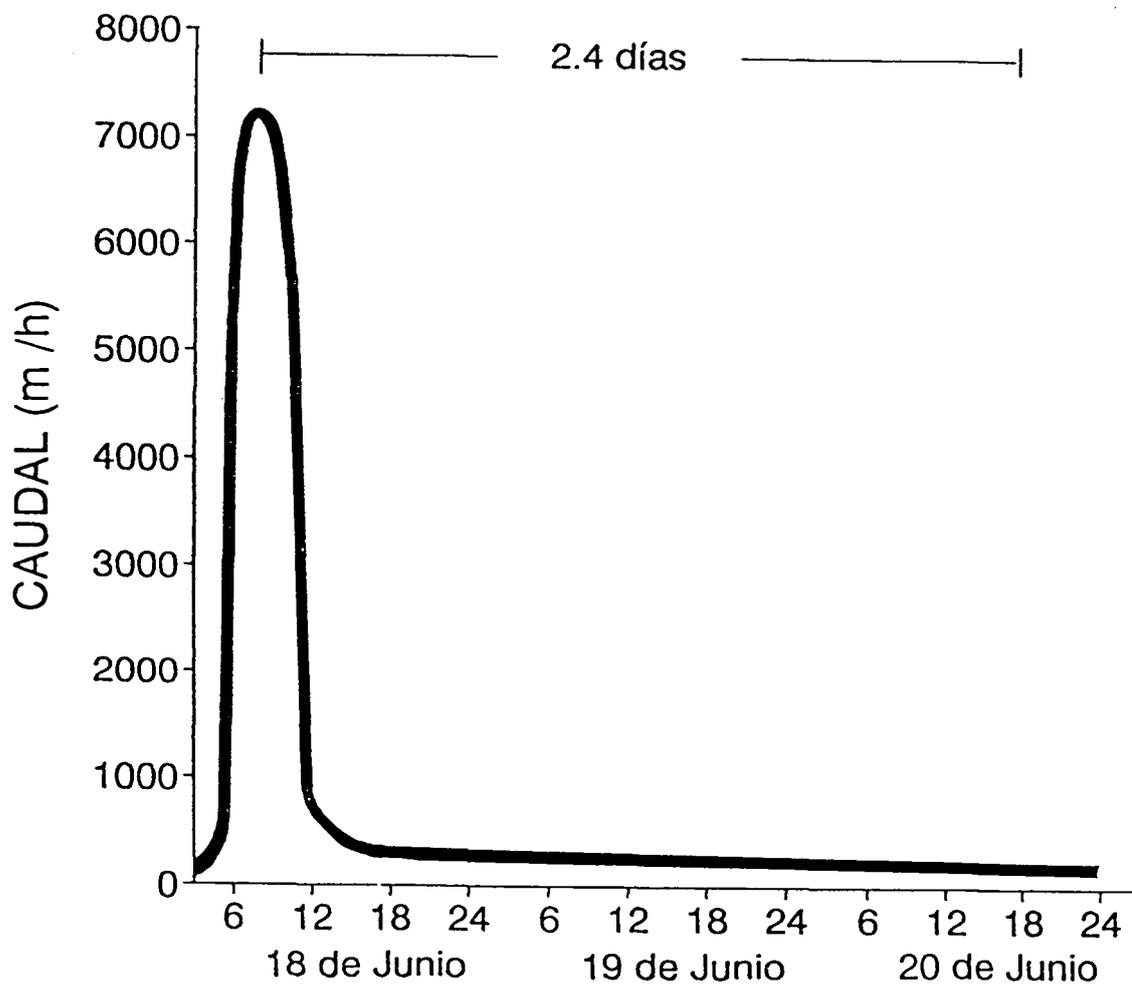
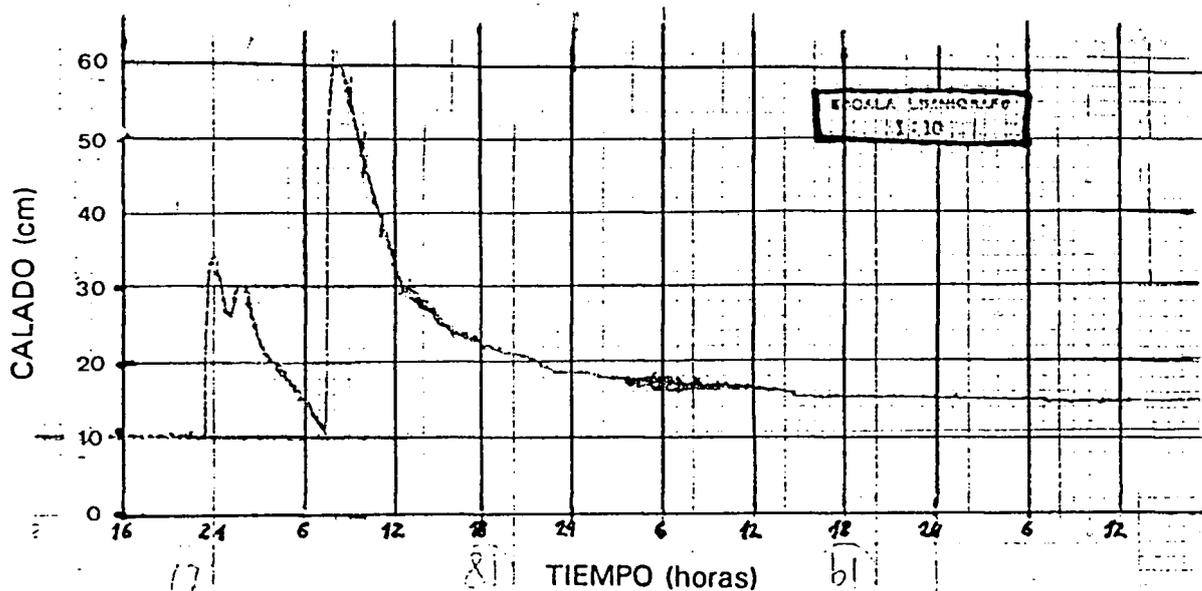


Tabla 55. Cálculo del coeficiente de escorrentía: valores de precipitación (P) y aportación total (A total) en la cuenca de recepción de la estación de aforos (A = 237 Km²), de la escorrentía superficial (Esup) y del coeficiente de escorrentía (Ce).

P (mm)	A total (Hm ³)	Esup (Hm ³ x10 ⁻³)	Ce (%)
16	3.79	1.40	0.005
27	6.40	0.30	0.037
33	7.82	0.21	0.002
35	8.30	0.21	0.002
23	5.45	0.26	0.005
40	9.48	4.66	0.049
14	3.32	1.30	0.039
83	19.67	9.46	0.048
15	3.55	1.30	0.036
Media			0.025

Muestreo del barranco de Valcuerna

El muestreo realizado en Enero de 1984, cuyos resultados se presentaron en "Material y Métodos", es de singular interés, ya que es la única información disponible de la CE de las aguas del barranco antes de que éste actuara como aliviadero del canal de Monegros y antes de la introducción del regadío en su cuenca de recepción. Por ello, los resultados obtenidos representan al sistema natural e indican que los aportes que recibe el barranco son mínimos hasta la zona situada por debajo de Peñalba, a partir de la cual existe una descarga de agua subterránea hacia el barranco. Por el contrario, el barranco en su tramo final recarga al acuífero, ya que el caudal circulante disminuye hasta hacerse nulo a unos dos Km del embalse de Mequinenza. El comportamiento como influente en este tramo no ha sido observado desde el inicio de los desagües del Canal de Monegros, ya que los mismos son suficientes para mantener un cierto volumen de agua a lo largo de todo el cauce de Valcuerna.

Por otro lado, la CE de las aguas aumentó a lo largo del cauce hasta estabilizarse a un valor de unos 14.4 dS/m hacia el Km 31.5 (Km 13 desde Peñalba) del cauce, lo que

sugiere que el acuífero que descarga en el barranco en régimen natural debe tener una CE de este orden de magnitud.

Aceptando como válido en primera aproximación que el caudal máximo del barranco era en la fecha de muestreo de 1984 de unos 25 L/s en el Km 31.5 del cauce, y que este caudal es constante a lo largo del año, la masa total de sales exportadas anualmente por Valcuerna en régimen natural sería de:

$$14.4 \text{ (dS/m)} \times [825 \times 10^{-9} \text{ (t/l)} \times \text{(dS/m)}^{-1}] \times 25 \text{ (L/s)} \times [31.5 \times 10^6 \text{ (s/año)}] = 9.355 \text{ t/año}$$

Asimismo, la masa exportada en el Km 25.5 (Km 7 desde Peñalba), que coincide con la ubicación posterior de la estación de aforos, sería de 3.430 t/año (valores de caudal de 10 L/s y de 13.2 dS/m de CE). En estos cálculos se ha considerado que 1 dS/m equivale a 825 mg/L de sólidos disueltos totales, que es el valor experimental obtenido para estas aguas.

Debe resaltarse que la estima visual del caudal puede aproximarse al caudal real, ya que en el punto donde posteriormente se ubicó la estación de aforos se estimó un caudal de 10 L/s, bastante similar a los valores aforados en 1986 antes de la introducción del riego en la cuenca de recepción de Valcuerna (Anexo 4).

Según estos resultados, las toneladas de sal estimadas equivalen a una exportación media diaria de 25.6 t en el Km 31.5 y de 9.4 t en el Km 25.5. Ello significa que el cauce de Valcuerna en este tramo de 6 Km recibe una masa de sales de 16.2 t, equivalentes a 2.7 t/Km. Finalmente, los valores unitarios de caudal y CE en este tramo del cauce son de 2.5 L/s x Km y 0.20 dS/m x Km.

Estos resultados establecen el orden de magnitud del caudal, salinidad y masa de sales que recibe el cauce en dicho tramo, así como la masa de sales exportada por Valcuerna en dos puntos de su cauce en condiciones de régimen natural, y pueden servir de referencia para los obtenidos en el balance de masas más refinado que se presenta más adelante.

A partir de Mayo de 1987 se efectuó un muestro periódico del barranco en 11 puntos de control, cuyos resultados de CE (medida "in situ") se presentan en el Anexo 7. Puede observarse que la CE del agua del canal de Monegros en la boca Sur del túnel de Alcubierre oscila entre 0.2 y 0.4 dS/m. En Marzo de 1988 no fluía agua y la determinación corresponde a un agua estancada en las proximidades del túnel, por lo que debe desestimarse. En estas Tablas se ha incluido asimismo el caudal de salida del túnel de Alcubierre, suministrado por C.H.E. (su precisión es cuestionable, pero es útil para establecer los órdenes de magnitud de los aportes del canal de Monegros al barranco), así como el caudal y la CE medidos en la misma fecha en la estación de aforos. Asimismo, se analizaron algunas de estas muestras en el laboratorio, obteniendo los resultados que se presentan en el Anexo 8.

La Figura 64 presentan la evolución de la CE a lo largo del barranco en 17 fechas de muestreo del período 1987-1990. Dicha evolución viene marcada fundamentalmente por el volumen de los desagües del canal de Monegros, que actúan como aguas de dilución y, de forma menos acusada, por el desarrollo del regadío en la cuenca del barranco. El punto del cauce en el que se empieza a notar la influencia del regadío (ascenso de CE) se fue desplazando aguas arriba a medida que las superficies de regadío se fueron incrementando también hacia la cabecera del barranco. Así, cuando el regadío se iniciaba aguas abajo del punto V-3 (1987), la CE se incrementaba también aguas abajo de dicho punto y, cuando se pusieron en regadío superficies aguas arriba de V-3, el incremento sustancial de CE tuvo lugar por encima de ese punto.

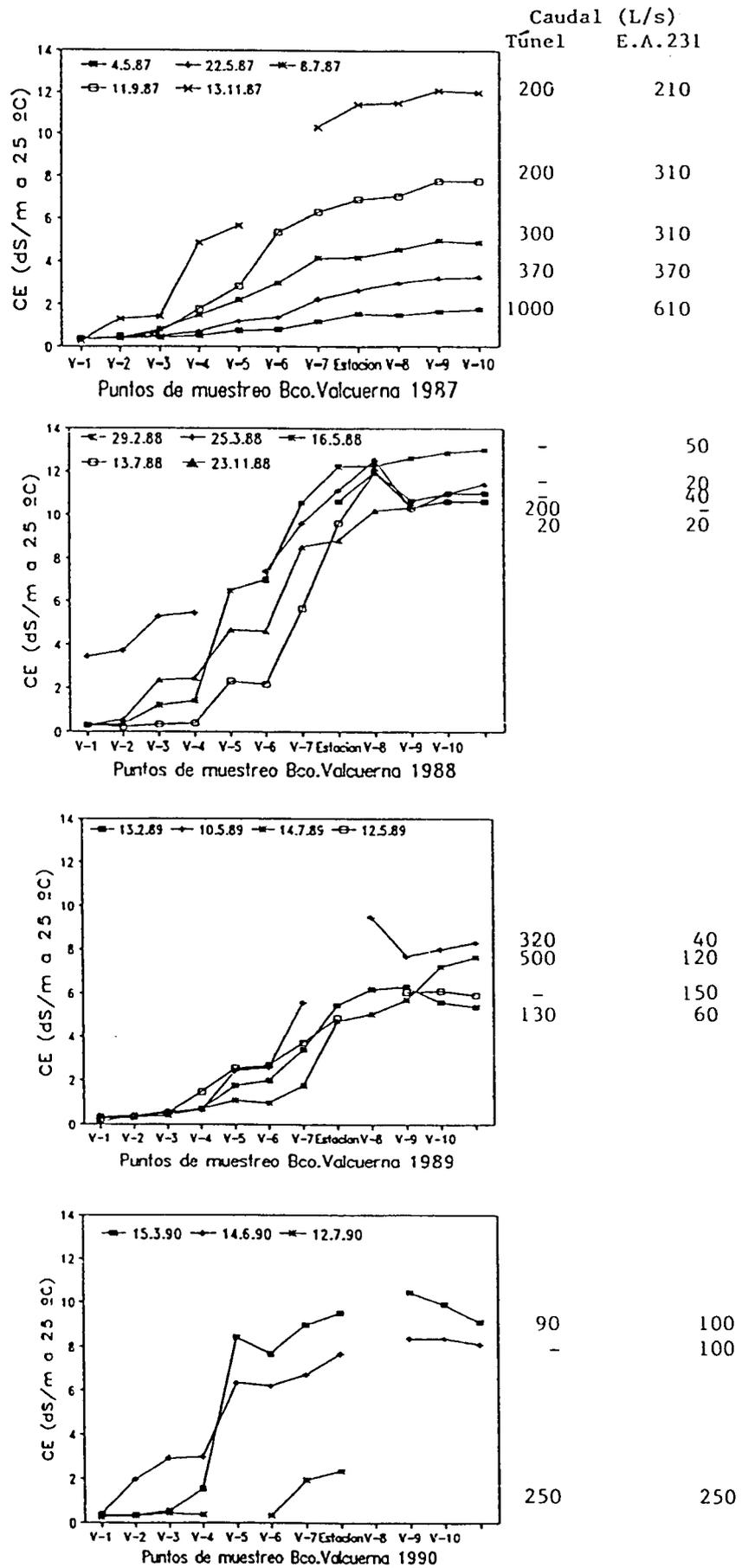


Figura 64. Evolución espacial y temporal de la CE (dS/m) en el Barranco de Valcuerna durante los años 1987-1990.

A partir de los valores de CE presentados en esta Figura y de los Km de cauce entre los puntos de muestreo, se ha generado la Tabla 56, en la que se presenta la variación de CE por Km del cauce para cada uno de los tramos entre dichos puntos de muestreo. El mayor incremento de CE se produce para el tramo situado entre los puntos V4 y VFR, lo que sugiere la existencia de posibles aportes subterráneos y el efecto de los retornos del regadío presente en dicho tramo. Desde el punto VFR hasta el V7 se producen unos incrementos de CE en torno a 0.2-0.4 dS/m x Km. En este tramo se dan los valores máximos de incremento por kilómetro (exceptuando el tramo anteriormente mencionado) y la causa de los mismos está relacionada con una hipotética descarga subterránea continua y/o con los vertidos procedentes de Peñalba y de las granjas situadas aguas abajo de Peñalba. Estos puntos se ven menos influidos por los desagües del Canal y, consecuentemente, la variabilidad entre muestreos y los valores de la moda son más homogéneos entre puntos que en el tramo de cauce de cabecera. Finalmente, los menores incrementos de CE se producen para los tramos iniciales y finales del barranco de Valcuerna.

Tabla 56. Variación de la CE de las aguas del barranco de Valcuerna por Kilómetro de cauce para los diferentes tramos entre los puntos de muestreo: media, coeficiente de variación (CV, %) y moda del conjunto de muestreos efectuados en el período 1987-1990.

TRAMO	Km TRAMO	VARIACION CE/Km (dS/m x Km)			
		Media	CV	moda	Nº obs.
V2-V1	2.8	0.08	184	0.007	15
V3-V2	3.7	0.09	143	0.054	12
V4-V3	4.0	0.14	167	0.150	13
VFR-V4	0.7	3.63	86	2.570	9
V5-VFR	3.8	0.22	224	0.052	7
V5-V4	4.5	0.33	94	0.333	13
V6-V5	4.0	0.42	82	0.275	10
V7-V6	4.0	0.37	69	0.300	12
V8-V7	4.0	0.13	74	0.175	8
V9-V8	4.0	0.10	46	0.075	10
V10-V9	4.0	0.04	90	0.075	10

Un ejemplo representativo de los resultados químicos de las muestras de agua recogidas en el cauce de Valcuerna, que se han presentado en el Anexo 8, se muestran en las Figuras 65 y 66. Estas Figuras son ejemplos de la composición iónica para caudales altos y bajos. La evolución de la composición iónica a lo largo del cauce es bastante uniforme en las distintas fechas de muestreo. Las aguas de cabecera presentan en general un predominio de los iones calcio y bicarbonato, pero a partir del punto V-3 o V-4, el sodio predomina ya sobre el calcio y, más adelante, el magnesio predomina también sobre el calcio.

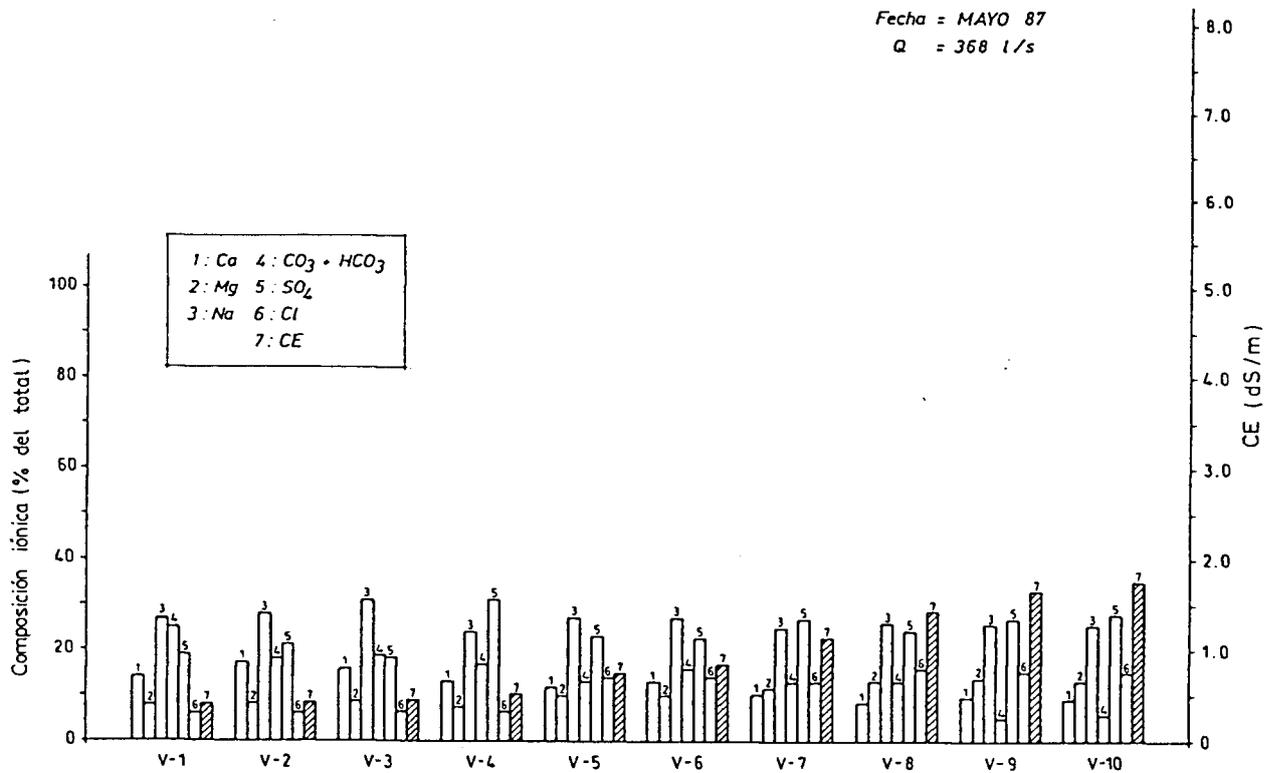


Figura 65. Barranco de Valcuerna: conductividad eléctrica (dS/m) y composición iónica porcentual de los puntos V-1 a V-10 en Mayo de 1987 para un caudal circulante de 368 L/s.

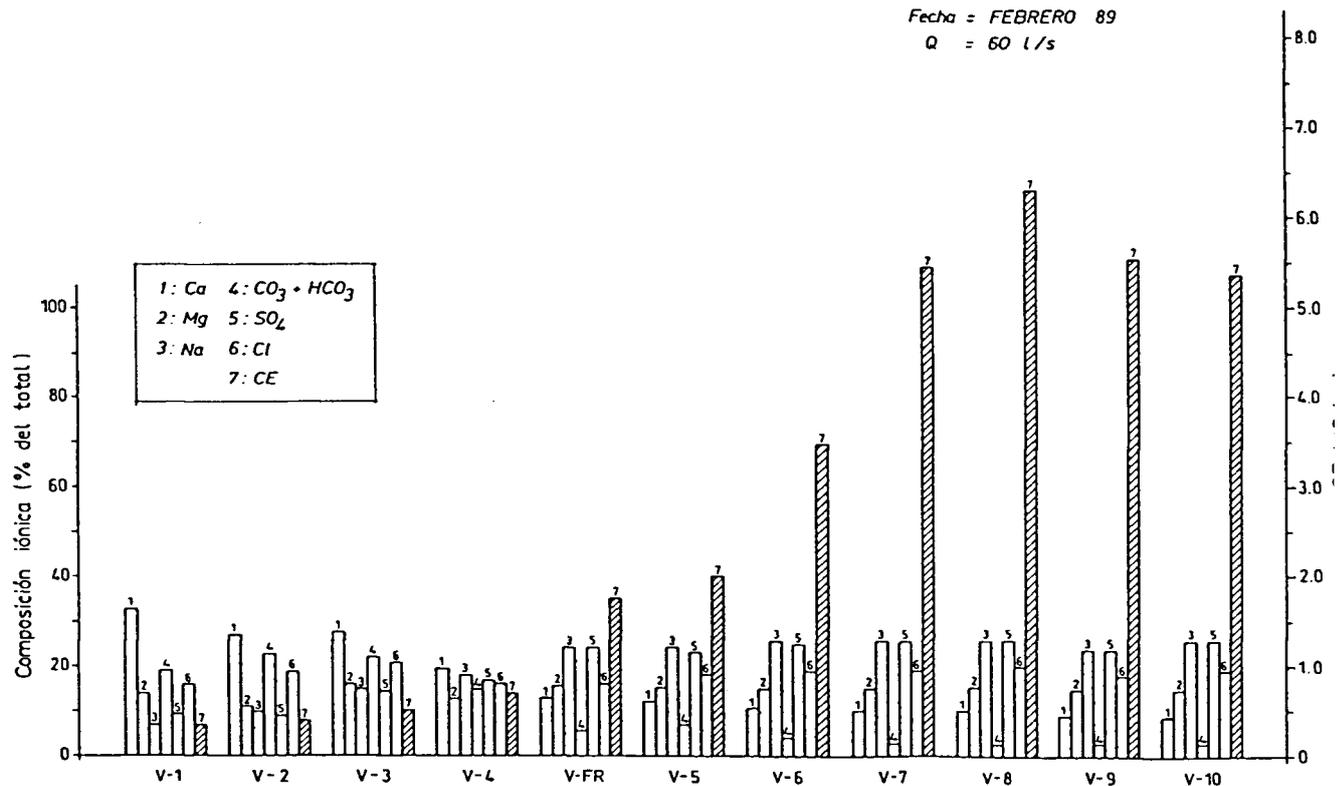


Figura 66. Barranco de Valcuerna: conductividad eléctrica (dS/m) y composición iónica porcentual de los puntos V-1 a V-10 en Febrero de 1989 para un caudal circulante de 60 L/s.

Asimismo, a partir de los puntos V-3 y V-4 según muestreos, el sulfato predomina ya sobre el cloruro, y ambos sobre el bicarbonato. Pueden observarse asimismo incrementos puntuales de algún ion o parejas de iones. Así, sulfato y sodio por un lado, y cloruro y magnesio por otro, presentan generalmente evoluciones paralelas.

Estos resultados indican que las aguas subsuperficiales que alcanzan el cauce de Valcuerna tienen una elevada proporción de iones sulfato, sodio, cloruro y magnesio, tal como corresponde a aguas saturadas en calcita y con $SO_4 > Ca$. Ello hace que las aguas del barranco estén sobresaturadas en calcita y que el índice de saturación del yeso aumente casi sistemáticamente con el recorrido del cauce, hasta alcanzar valores próximos a saturación a partir del punto V-6 (Figura 67). El ligero descenso del IS del yeso que se observa en los puntos V9 y V10 está asociado con un ligero descenso de la CE observado en algunas fechas en esos mismos puntos, y sugiere la existencia de descargas subterráneas en esos tramos más diluidas y con menor contenido en Ca y/o SO_4 .

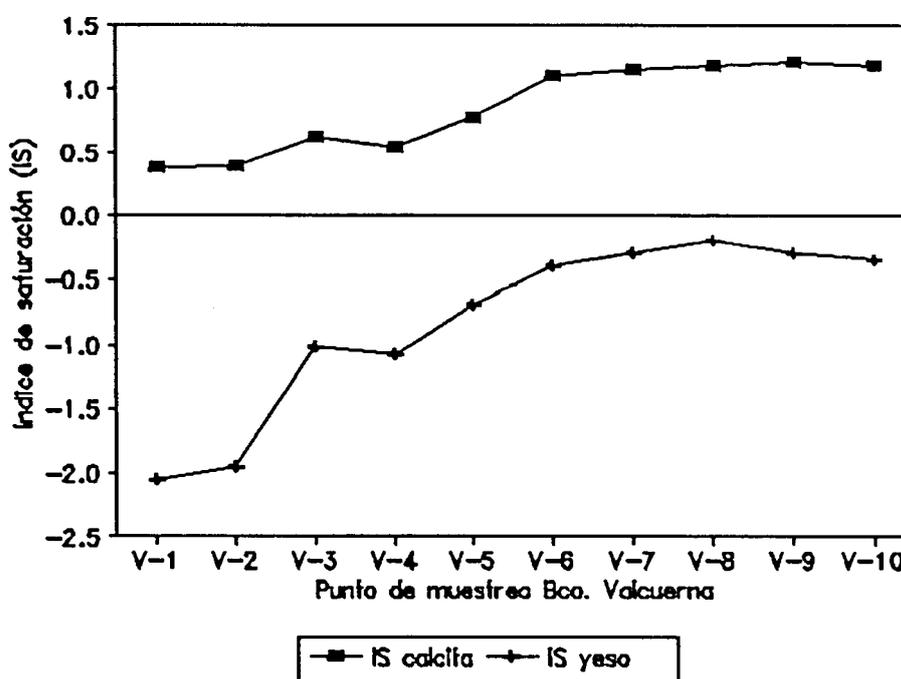


Figura 67. Barranco de Valcuerna: Valores del IS en yeso y calcita calculados con WATEQ para los puntos de muestreo V1 a V10.

A lo largo del Barranco de Valcuerna aparecen manantiales o zonas de rezume dentro de las vertientes excavadas por el propio cauce o en el fondo del cauce reprofundizado a consecuencia de las obras de transformación en regadío. El resultado del muestreo complementario de estos puntos de agua se presenta en la Tabla 57.

Tabla 57. Barranco de Valcuerna: conductividad eléctrica (dS/m a 25°C) de las aguas muestreadas en las áreas de rezume y manantiales.

Punto Muestreo	Marzo 88	Junio 89	Junio 90
D-1	4.13	4.22	4.12
D-2	5.69	5.80	5.82
D-3	7.31	7.42	7.35
D-4	8.23	8.21	8.25
D-5	12.02	13.06	13.35
D-6	12.30	12.26	12.32

De la situación de los puntos en la Figura 51 se deduce que los situados en la cabecera del cauce tienen unos valores de CE sensiblemente inferiores a los ubicados aguas abajo. Las CEs de los puntos D-1 a D-4 son similares a las de los pozos próximos y corresponden a aguas subterráneas procedentes del aluvial cuaternario, lo que explica su menor contenido en sales. Los puntos D-5 y D-6 tienen unos valores de CE más elevados, debido a que son aguas procedentes de los materiales miocenos que localmente constituyen acuíferos. Sus contenidos salinos son similares al del pozo n° 136 situado aguas abajo de Peñalba. En 1991 se detectó un nuevo rezume (Km 11 del cauce) de aguas subterráneas en una zanja efectuada para la instalación de tuberías de presión. La CE obtenida en un único muestreo fue de 17 dS/m. El rezume estaba situado entre los puntos V-4 y VFR, lo que puede explicar, al menos en parte, el incremento de salinidad que se ha observado sistemáticamente en dicho tramo (Tabla 56).

Por otro lado, puede observarse que los valores de CE medidos en las distintas fechas de muestreo son, para cada punto, muy similares entre sí, lo que indica que las aguas proceden de acuíferos en régimen permanente.

Estimación de la componente subterránea

Tal como se describió en "Material y Metodos" (Capítulo 5.3), esta estima se ha efectuado siguiendo varias metodologías diferentes.

La primera de ellas (descomposición del hidrograma por el método de Barnes [1976]) arrojó unos valores de descarga subterránea de 9.4 L/s para el tramo del cauce entre el túnel de Alcubierre y la estación de aforos.

En segundo lugar, se efectuó una estimación de la aportación subterránea basada en el muestreo de 1984, que arrojó un valor de 2.5 L/s x Km con una CE media de 13.8 dS/m para el tramo del Km 25.5 al 31.5.

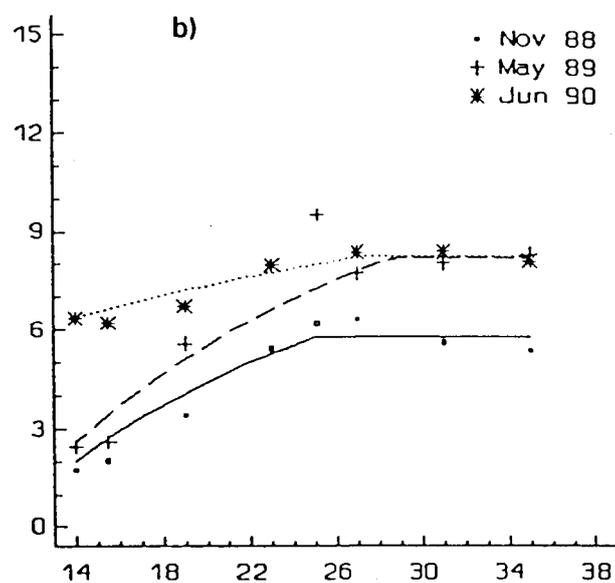
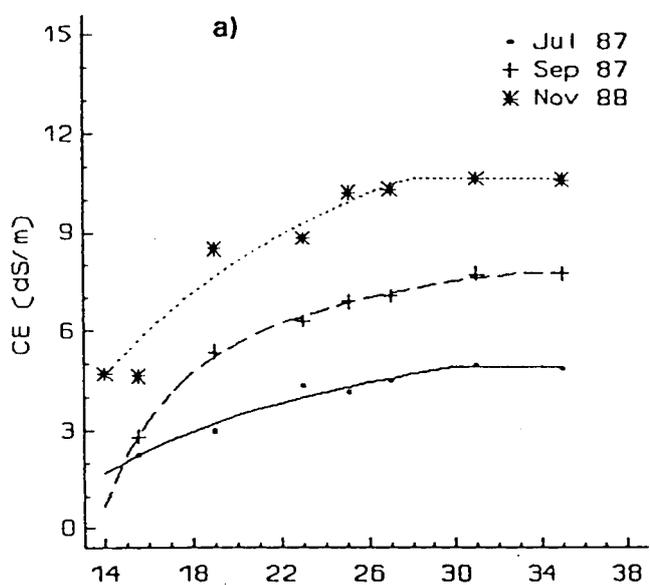
En tercer lugar, en este apartado se aplican los datos obtenidos en el seguimiento espacio-temporal de la salinidad en el barranco de Valcuerna a la estimación de la componente subterránea, aplicando dos alternativas metodológicas:

(a) De acuerdo con la metodología propuesta por Cuas et al. (1990), se ha efectuado, para distintas fechas de muestreo, un ajuste no lineal de los valores de CE con la distancia del barranco desde el túnel de Alcubierre según los modelos I y II (Figura 68). El modelo I inicia la descarga en un punto del cauce y la anula en un punto situado aguas abajo y cuya localización respecto a la cabecera es establecida por el modelo. En el modelo II, dicho punto es fijo y se hace coincidir con la zona del cauce que actúa de sumidero (Km 33.5). Los parámetros obtenidos y el coeficiente de determinación de dichos ajustes se presentan en la Tabla 58 para aquellos muestreos con valores de R^2 próximos o superiores a 0.90.

Tabla 58. Valores del caudal de descarga subterránea por Km de cauce (Q), conductividad eléctrica (CE), distancia a la que se anula la descarga subterránea respecto al Túnel de Alcubierre (d) y R^2 de los modelos I y II para distintas fechas de muestreo del Bco de Valcuerna.

FECHA MUESTREO	MODELO I			
	Q (L/S Km)	CE (dS/m)	d (Km)	R^2
07-87	3.3	8.3	29.9	0.96
09-87	3.8	9.5	33.0	0.99
11-88	1.8	18.2	27.7	0.95
02-89	1.8	13.6	25.0	0.93
05-89	1.2	18.2	28.4	0.97
06-90	2.0	13.5	27.2	0.91
	MODELO II			
07-87	3.5	7.8	33.5	0.96
09-87	3.6	9.8	33.5	0.99
11-87	1.1	15.1	33.5	0.99
02-88	3.2	11.0	33.5	0.91
11-88	2.2	15.2	33.5	0.95
02-89	2.6	9.1	33.5	0.87
05-89	1.5	14.5	33.5	0.97
06-90	1.8	13.8	33.5	0.89

MODELO I



MODELO II

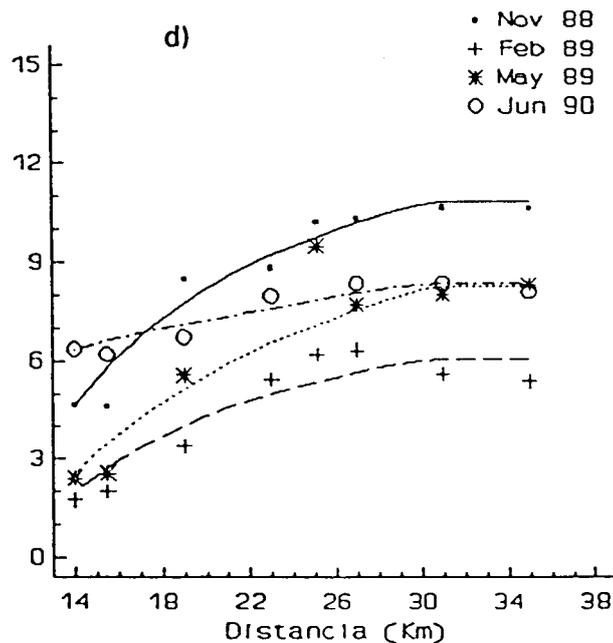
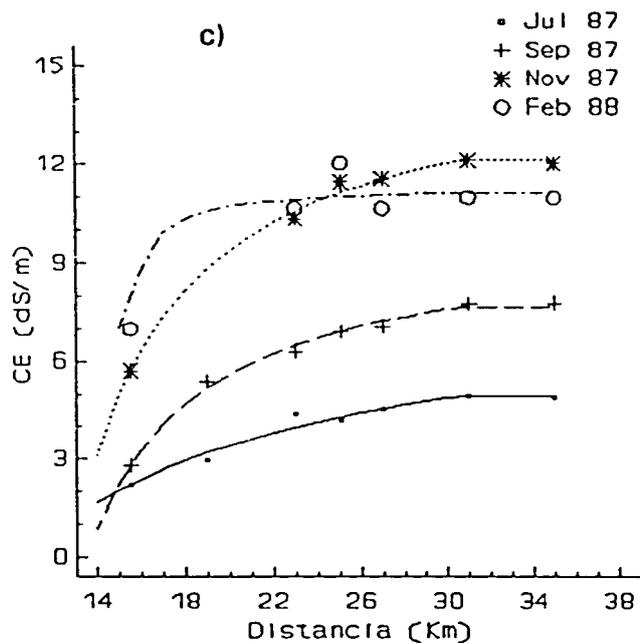


Figura 68. Barranco de Valcuerna: gráficas de ajuste no lineal de la evolución de la CE a lo largo del cauce del barranco (tramo Km 14 a Km 38) en distintas fechas de muestreo para los modelos I (a y b) y II (c y d).

Los resultados del modelo I abarcan un intervalo de valores relativamente alto, tanto para el caudal (1.2 a 3.8 L/s) como para la CE (8.3 a 18.2 dS/m). Las estimas de descarga subterránea en 1987 son superiores a las obtenidas en el balance de masas simplificado de 1984 (2.50 L/s x Km), mientras que en el resto de los años son inferiores (Febrero de 1988 y 1989). Los valores de CE estimados, salvo para Febrero de 1989 y Junio de 1990, son claramente distintos a los medidos en régimen natural. Del mismo modo, el punto donde se anula la descarga subterránea se aproxima al lugar del cauce donde se sitúa el sumidero únicamente para el muestreo de Septiembre de 1987, pero en el resto dicho valor es claramente inferior. En definitiva, aunque los valores medios de los muestreos que se presentan arrojan valores razonables de Q (2.3 L/s x Km) y de CE (13.6 dS/m), el valor de d (28.5 Km) es inferior al estimado visualmente en el muestreo de 1984.

El modelo II produce unos resultados (Q medio = 2.4 L/s x Km y CE media = 12.0 dS/m) bastante similares a los del modelo I, aunque los coeficientes de variación de estas medias son inferiores en el modelo II, lo que le da mayor grado de fiabilidad.

En resumen, los resultados de los modelos I y II producen unas estimas medias de descarga subterránea de 2.4 L/s x Km (caudal) y 12.8 dS/m. Estos valores son inferiores en un 4% (Q) y un 7% (CE) a las estimaciones efectuadas a partir del balance de 1984, indicando por consiguiente un ajuste excelente entre los valores medidos y estimados, aunque debe tenerse en cuenta que los tramos analizados no fueron los mismos en cada caso.

(b) Una segunda alternativa para la estimación de la descarga subterránea se realizó a través de un balance de masas simplificado efectuado, para distintas fechas de muestreo, entre cada punto de muestreo (V1 a V7) y la estación de aforos.

La ecuación utilizada es (apartado 5.3):

$$Q_{as} = Q_{et} (CE_{et} - CE_{es}) / (CE_{as} - CE_{es}) \quad (31)$$

donde Q_{as} es la descarga subterránea en el tramo Vi-Estación de Aforos, CE_{et} y Q_{et} son la CE y Q en la estación de aforos, CE_{es} es la CE en cada punto de muestreo Vi, y CE_{as} es la CE de la descarga subterránea, que se asume igual al valor medio de 14 dS/m medido en el muestreo de 1984.

Los resultados obtenidos en este balance se presentan en la Tabla 59, junto con los valores medios (expresados como caudal absoluto (L/s) y unitario (L/s x Km)) de los tres muestreos con caudales inferiores a 50 L/s (Mayo 88, Noviembre 88 y Mayo 89). De esta Tabla se deduce que el caudal aportado por el canal de Monegros tiene una influencia importante sobre las estimas efectuadas, lo que implica que los descensos de CE asociados a los incrementos del caudal son menores que los que se derivarían del simple efecto de dilución. Ello significa que dichos caudales aportan asimismo sales provenientes no sólo del agua del canal sino de procesos de lavado y arrastre de sales presentes en los suelos recientemente transformados a regadío.

De acuerdo con los resultados de la Tabla 59, la descarga subterránea media hacia el barranco de Valcuerna en el tramo comprendido entre el punto V1 y la estación de aforos es de 19.6 L/s ó 0.77 L/s x Km. Este valor es sensiblemente superior a la descarga subterránea estimada en régimen natural (6 L/s) y a la estimada en la

descomposición del hidrograma (9.4 L/s), lo que sugiere, teniendo en cuenta las simplificaciones efectuadas en este balance, que la introducción del regadío en la cuenca de recepción del barranco está aportando subsuperficialmente al cauce unos caudales medios en torno a 10.2- 13.6 L/s.

Tabla 59. Valores de la descarga subterránea (L/s) en cada tramo Vi-E.aforos para 15 fechas de muestreo, y valores medios (L/s), desviación estándar (σ_{n-1}) y coeficiente de variación (CV, %) para las fechas de muestreo sin riego (*).

FECHA MUESTREO	Q _{1-e.a.}	Q _{2-e.a.}	Q _{3-e.a.}	Q _{4-e.a.}	Q _{5-e.a.}	Q _{6-e.a.}	Q _{7-e.a.}
Mayo 87 I	53.2	52.8	50.7	47.4	38.1	36.4	18.9
Mayo 87 II	62.0	61.6	58.4	54.2	42.6	37.5	12.6
Julio 87	86.9	85.7	79.3	66.6	51.3	33.7	0.3
Septiembre 90	148.5	147.6	145.1	129.6	113.0	54.3	23.4
Noviembre 87	170.9	167.8	167.4	151.2	145.5	-	64.5
Mayo 88 *	17.2	17.1	16.6	16.5	15.6	-	9.8
Mayo 88	43.6	43.6	43.2	43.1	37.6	24.9	0.8
Julio 88	85.3	85.2	85.1	85.0	82.8	75.6	53.9
Noviembre 88 *	14.5	14.3	13.5	13.4	11.9	6.2	5.3
Febrero 89	25.6	25.5	25.3	24.8	20.9	15.7	5.3
Mayo 89 *	27.0	26.7	26.5	26.4	24.2	18.6	-
Julio 89	41.4	41.4	40.8	39.1	37.3	32.1	4.2
Septiembre 89	105.8	105.3	102.9	92.0	74.8	57.2	34.1
Junio 90	54.2	48.3	43.8	43.5	20.2	14.7	1.7
Julio 90	37.3	36.6	36.0	35.5	34.6	6.8	-
MEDIA *	19.56	19.36	18.86	18.76	17.23	12.73	7.55
σ_{n-1}	6.57	6.50	6.78	6.79	6.31	6.22	3.18
CV %	33	33	36	36	37	49	42
Q _{as} L/sxKm	0.77	0.85	0.99	1.25	1.64	1.96	3.02

A partir de la Tabla 59 se ha generado, por diferencia entre los respectivos tramos, la Tabla 60, que presenta los valores de descarga subterránea (L/s) para cada uno de los tramos comprendidos entre los diferentes puntos de muestreo V1 a V7. Asimismo, dicha Tabla presenta la media de los muestreos con caudales inferiores a 50 L/s, que son lógicamente los menos afectados por las aguas del canal de Monegros. Las estimas obtenidas en períodos de riego están influidas por la existencia de caudales circulantes muy elevados que diluyen las aportaciones subterráneas, cuantitativamente mucho menos

importantes, y por las detracciones de agua de buena calidad que retornan al cauce superficial o subsuperficialmente con una mayor concentración salina. Todo ello implica una menor fiabilidad de dichas estimas.

Considerando por consiguiente los valores medios de los muestreos de Mayo 88 y 89 y de Noviembre 88, la Tabla 60 indica que aguas arriba de Peñalba Q_{ss} tiene un valor inferior a 0.34 L/s x Km, en tanto que aguas abajo de Peñalba los valores de Q_{ss} aumentan sustancialmente, hasta alcanzar un valor máximo de 3.0 L/s x Km entre V7 y la estación de aforos.

En la Tabla 61 se presenta un resumen de las estimaciones de la descarga subterránea efectuadas por las distintas metodologías. La conclusión es que los resultados son sustancialmente coincidentes, de tal manera que puede aceptarse que la descarga subterránea es muy pequeña para los primeros kilómetros del barranco (valores inferiores a 0.4 L/s x Km) y aumenta paulatinamente hasta alcanzar valores de 2.5 L/s x Km para los últimos kilómetros mas próximos al río Ebro.

Tabla 60. Barranco de Valcuerna: valor de la descarga subterránea (Q_{ss} , L/s) por tramo de cauce en diferentes fechas de muestreo. Media y desviación estándar y coeficiente de variación de los muestreos sin riego (*).

FECHA	Q_{1-2}	Q_{2-3}	Q_{3-4}	Q_{4-5}	Q_{5-6}	Q_{6-7}	$Q_{7-E.A.}$
Mayo 87 I	0.4	2.0	3.3	9.3	1.7	17.5	18.9
Mayo 87 II	0.4	3.2	4.2	11.6	5.1	24.9	12.6
Julio 87	1.2	6.4	12.7	15.3	17.6	33.4	0.3
Septiembre 87	0.9	2.5	15.5	16.6	58.7	30.9	23.4
Noviembre 87	3.1	0.4	16.2	5.7	-	80.5 ^m	64.5
Marzo 88 *	0.1	0.5	0.1	0.9	2.2	3.6	9.8
Mayo 88	0.0	0.4	0.1	5.5	12.7	24.0	0.8
Julio 88	0.1	0.1	0.1	2.2	7.2	21.7	53.9
Noviembre 88 *	0.2	0.8	0.1	1.5	5.7	0.9	5.3
Febrero 89	0.1	0.2	0.5	3.9	5.2	10.4	5.3
Mayo 89	0.3	0.2	0.1	2.2	5.6	-	-
Julio 89	0.0	0.6	1.7	1.8	5.2	27.8	4.25
Septiembre 89	0.5	2.4	10.9	17.2	17.6	23.1	34.1
Junio 90	5.9	4.5	0.3	23.3	5.5	12.9	1.73
Julio 90	0.7	0.6	0.5	0.9	27.7	-	-
MEDIA *	0.2	0.5	0.1	1.5	4.5	2.2	7.55
σ_{n-1}	0.1	0.6	0	0.6	2.0	1.9	3.2
CV %	50	60	0	42	44	85	42
CAUDAL UNITARIO (L/S x Km)	0.07	0.135	0.02	0.34	1.13	0.56	3.0

* Fecha sin riego en la cuenca de recepción.

(1) Q_{5-7}

Tabla 61 Barranco de Valcuerna: valores estimados para la descarga subterránea (Q_{ss} , L/s x Km) por diferentes metodologías: (1) Descomposición del hidrograma, (2) Balance de masas en 1984, (3) Modelo I, (4) Modelo II y (5) Balance de masas simplificado. Se presenta asimismo el tramo del cauce (Km) para el que se estimó Q_{ss} con las diferentes metodologías.

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(5)
Q_{ss} (L/S*Km)	0.37	2.5	2.3	2.4	0.77	3.02
CE_{ss} (dS/m)	-	13.8	13.6	12	-	-
TRAMO Km	0 a 25.5	25.5 a 31.5	14 a 28.4	14 a 33.5	0 a 25.5	23.0 a 25.5

Balance de masas

Tal como se detalló en el capítulo de "Material y Metodos", la masa de sales exportada por el barranco de Valcuerna en la E.A. N° 231 se ha estimado a partir de los caudales diarios y de los sólidos disueltos totales (TDS) deducidos de la medida diaria de la CE y de la ecuación de regresión lineal que relaciona ambas variables. Dicha ecuación (Figura 52) presenta un coeficiente de regresión superior al obtenido por Aragüés (1983) para las aguas superficiales de la Cuenca del Ebro. Este autor señala que el factor de transformación entre ambos parámetros varía en función de la composición iónica del agua, con valores que van desde 500 en aguas bicarbonatadas hasta 950 para aguas sulfatadas. Los valores obtenidos en la ecuación ($b = 825$) indican, consecuentemente, una composición de las aguas mayoritariamente sulfatada, lo que está de acuerdo con los resultados presentados anteriormente (Anexo 6).

En la Tabla 62 se presentan, para régimen natural (hasta el 15 de Septiembre de 1986) y régimen de regadío (a partir del 16 de Septiembre de 1986), (1) la aportación total mensual (Qm^3 /mes), (2) la masa mensual acumulada de sales (toneladas, t) medida en la E.A. en las fechas con datos de Q y CE, (3) el número de días con medidas de Q y CEs, (4) las toneladas/día medias mensuales y (5) la CE media mensual. A partir de las toneladas/día medias mensuales se han calculado las t/día medias anuales, que multiplicadas por 365 días han arrojado las estimas de sales totales exportadas anualmente por el barranco en la estación de aforos y que se presentan en la última fila de la Tabla. Aunque este procedimiento tiene limitaciones sustanciales derivadas de la falta de datos en diferentes meses, se ha preferido al procedimiento alternativo basado en estimas a partir de las relaciones Q-CE (Aragüés y Alberto, 1983) dados los valores relativamente bajos de sus coeficientes de determinación.

Tal como era de esperar, las t/día medias anuales de sal exportadas en régimen natural son muy inferiores a las exportadas en régimen de regadío. En términos generales, los valores de regadío (entre 30 y 60 t/día si se descarta 1986 por atípico) son entre cuatro y siete veces mayores que los valores obtenidos en régimen natural (8.3 t/día). El valor de 1986 está muy afectado por los altos valores de caudal circulantes, que unidos a los elevados valores de CE registrados en la E.A., arroja unos resultados para la masa de sales mensual de los meses de Septiembre y Octubre claramente sobreestimados y que afectan enormemente al valor medio anual. Dado que la masa de sales aportadas por las aguas del canal de Monegros es muy pequeña (su TDS es inferior a 200 mg/L, comparado con valores de 10.000 mg/L o superiores para las aguas del

barranco), ello significa que los flujos de retorno del riego contribuyen sustancialmente a estos incrementos de masa.

Tabla 62. Masa de sales en régimen natural (R.N.) y en régimen de regadío (R.R.) medida en la estación de aforos nº 231 del barranco de Valcuerna: valores mensuales, anuales y valores medios diarios.

MES	PERIODO					
	R.N.	R.R.				
		1986	1987	1988	1989	1990
E Q (m³/mes)	28947	-	37229	97343	102038	174960
E t	0	-	400	968	774	1393
N° días	0	-	31	20	31	31
R t/día	0	-	12,90	48,4	24,96	44,93
O CE _{media} (dS/m)	-	-	13,0	12,1	9,2	9,7
F Q (m³/mes)	26436	-	42496	88024	147225	124070
F t	0	-	422	872	1166	-
N° días	0	-	28	29	28	-
R t/día	0	-	15,07	30,06	41,64	-
O CE _{media} (dS/m)	13,6	-	12,0	12,0	9,6	-
M Q (m³/mes)	23727	-	45632	86409	108777	337478
M t	268	-	453	874	984	-
N° días	31	-	31	31	31	-
Z t/día	8,64	-	14,61	28,20	31,74	-
O CE _{media} (dS/m)	13,7	-	12,0	12,3	10,9	-
A Q (m³/mes)	23307	-	414403	338882	113529	397699
A t	261	-	2438	2375	952	-
N° días	30	-	30	30	30	-
I t/día	8,70	-	81,26	79,16	31,73	-
L CE _{media} (dS/m)	13,5	-	11,1	9,9	9,5	-
M Q (m³/mes)	24345	-	740752	170650	117849	627350
M t	274	-	1752	1718	869	-
N° días	31	-	31	31	31	-
O t/día	8,83	-	53,51	55,41	28,03	-
CE _{media} (dS/m)	13,6	-	4,1	12,2	8,9	-
J Q (m³/mes)	91783	-	97375	102297	-	253670
J t	508	-	811	962	-	1372
N° días	30	-	30	30	-	30
I t/día	16,93	-	27,03	32,06	-	45,73
O CE _{media} (dS/m)	12,3	-	10,5	11,4	8,8	6,2
J Q (m³/mes)	21339	-	128675	35129	601430	570845
J t	243	-	724	347	1950	495
N° días	31	-	31	12	31	8
I t/día	7,83	-	23,35	28,90	62,90	61,87
O CE _{media} (dS/m)	13,8	-	7,1	10,3	4,0	5,2
A Q (m³/mes)	41171	-	161020	-	1136x10 ³	591062
A t	418	-	1170	-	3945	-
N° días	31	-	31	-	31	-
T t/día	13,48	-	34,51	-	127,25	-
O CE _{media} (dS/m)	12,5	-	8,0	10,8	6,3	-
S Q (m³/mes)	126	10932	144198	-	533779	1131x10 ³
S t	122	12824	-	-	3559	2673
N° días	15	15	-	-	30	30
R t/día	8,13	855	-	-	118,63	89,10
E CE _{media} (dS/m)	13,5	12,5	-	9,4	7,7	4,6
O Q (m³/mes)	-	1395x10 ³	-	-	278813	-
O t	-	7955	-	-	1931	-
N° días	-	31	-	-	31	-
R t/día	-	256,6	-	-	62,29	-
E CE _{media} (dS/m)	-	9,9	-	8,3	8,5	-
N Q (m³/mes)	-	65420	-	119451	226800	-
N t	-	709	-	1043	1715	-
N° días	-	30	-	30	30	-
R t/día	-	23,63	-	34,76	57,16	-
E CE _{media} (dS/m)	-	13,0	11,2	10,6	9,2	-
D Q (m³/mes)	-	37229	-	125565	273197	-
D t	-	410	-	1042	-	-
N° días	-	31	-	31	-	-
R t/día	-	13,22	-	33,60	-	-
E CE _{media} (dS/m)	-	13,3	12,1	10,2	-	-
AÑO	8,3	204,7	33,2	42,0	68,6	69,9
t/día	3041	74699	12100	15320	21400	21870
t/año						

En la distribución mensual de la masa de sales se aprecia que los valores máximos se dan en Septiembre y Octubre de 1986. Como ya se ha anticipado, dichos máximos están propiciados por los elevados caudales circulantes en las pruebas de desagüe del Canal de Monegros. Los valores mínimos corresponden al régimen natural y a los meses de invierno (no riego) y verano (riego intensivo de cultivos), meses en los que el caudal medido en la E.A. es inferior al medido en primavera (Abril y Mayo). Para un determinado mes, se aprecia generalmente un incremento de la masa de sales entre 1986 y 1990, lo que indica de nuevo el efecto del regadío sobre la masa total de sales exportadas por Valcuerna.

Dicho efecto se aprecia claramente en la Figura 69, en la que se ha representado la masa de sales media mensual exportada por el barranco frente al caudal circulante en la estación de aforos. El hecho de que la masa de sales aumente linealmente con el caudal circulante en el intervalo de caudales entre 1.000 y 15.000 m³/día indica que la salinidad del agua es relativamente constante. Así, la pendiente de la recta en dicho intervalo equivale a la concentración salina del agua y alcanza un valor de 8 dS/m. Ello sugiere que los incrementos de caudal están asociados a una recarga del acuífero y/o al lavado de sales del suelo o subsuelo, que modulan los descensos de salinidad que deberían esperarse si esas aguas de baja CE provenientes del canal de Monegros produjeran el simple mecanismo esperado de dilución. Este mecanismo se aprecia claramente con caudales circulantes mayores (Figura 65) para los que la masa de sales exportadas es sensiblemente inferior a la esperada si la salinidad del agua se mantuviera al nivel de 9 dS/m señalado anteriormente.

Sin embargo, esta masa de sales suplementaria no refleja el volumen y salinidad de los efluentes de riego ya que se está valorando conjuntamente con el agua del Canal de Monegros. La masa de sales procedente de los flujos de retorno del riego, es decir, la masa aportada en los períodos en los que el caudal de salida del Túnel de Alcubierre es nulo menos la masa aportada en régimen natural, se presenta en la Tabla 63.

Tabla 63. Aportación y masa de sales en período de no riego, aportación y masa de sales en régimen natural y aportación y masa de sales de los flujos de retorno de riego obtenidos por diferencia entre el período de no riego y el régimen natural. TDS y CE de las F.R.R. resultantes de la relación entre la masa de sales y el volumen de agua aportada.

AÑO	Aportación N.R. Hm ³ /año	Masa sales R.N. t	Aportación N.R. Hm ³ /año	Masa sales N.R. t	Aportación F.R.R. Hm ³ /año	Masa sales F.R.R. t	TDS mg/L	CE dS/m
1987	1606	1269	337	0.16	0.09	0.06	5435	6.58
1988	4799	1536	3263	0.52	0.16	0.35	9165	11.13
1989	1643	612	1031	0.19	0.06	0.13	7930	9.60

De esta Tabla puede deducirse que los valores estimados de CE de los efluentes de riego son muy elevados (en torno a 8.5 dS/m para el conjunto de los tres años). Dado

que la salinidad de los suelos no es tan elevada (capítulo 3.4.2), estas estimas sugieren, como ya se ha mencionado, que parte de las aguas de retorno del riego percolan en profundidad y recargan el acuífero salino, incrementando por lo tanto el gradiente hidráulico e induciendo un flujo mayor de agua y sales hacia el barranco.

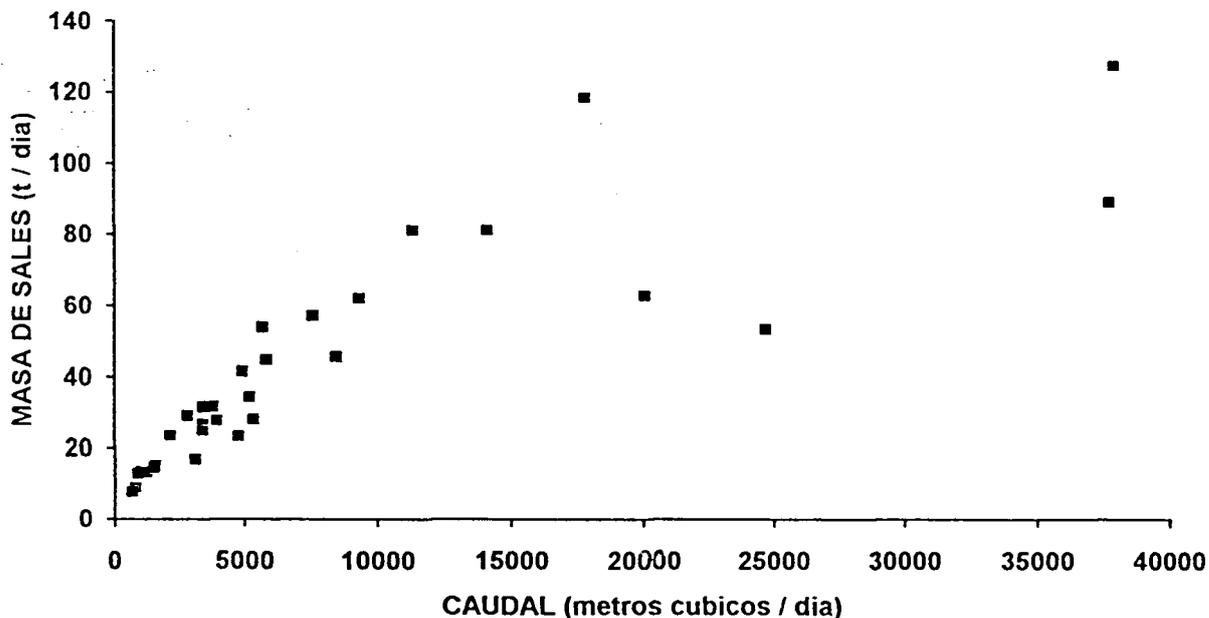


Figura 69. Barranco de Valcuerna: relación entre caudal (m³/día) y masa de sales (t/día) medios mensuales exportados por el Barranco de Valcuerna en el período 1986-1990.

5.4.3. Áreas endorreicas

En el Anexo 9 se presentan las características principales de las áreas endorreicas estudiadas y una síntesis de las observaciones y análisis químicos realizados en el período de estudio de 1987 a 1990.

Clasificación hidrológica

1. Clasificación basada en los datos climáticos del período En 89-Sept 90.

Los valores medios del factor fisiográfico (Ff) y climático (Fc) de las quince lagunas más importantes de Monegros II se presentan en la Tabla 64 y se representan gráficamente en la Figura 70. El factor fisiográfico (Ac/AI) expresa la importancia de la superficie de la cuenca de recepción sobre el desarrollo de una laguna, cuando se consideran exclusivamente los componentes superficiales del régimen hídrico. En este caso, las superficies de inundación y de la cuenca de recepción están directamente relacionadas.

En las lagunas de Monegros II las áreas de máxima inundación, definidas por la superficie del sedimento salino, oscilan entre 0.075 y 1.9 Km² y las áreas de la cuenca entre 0.075 y 20.5 Km². La correlación entre ambas variables ($R^2=0.50$) (Figura 71) es sólo significativa al 1%, lo que sugiere que existen otros componentes del régimen hídrico, presumiblemente subsuperficiales y/o subterráneos, que afectan a la relación Ac vs. AI.

Tabla 64. Características fisiográficas (Ac, AI), parámetros climáticos del período Enero.89-Septiembre.90 (P, P', E) mm. y factores fisiográfico (Ff) y climático (Fc) de quince lagunas de Monegros II.

LAGUNA NOMBRE	Superficie cuenca,Ac (Km ²)	Superficie de máxima inundación,AI (Km ²)	Precipitación P (mm)	Escorrentía P' (*) (mm)	Evaporación E (mm)	Ff	Fc
AMARGA I	0.300	0.100	552	20.4	2643	3.00	103.5
AMARGA II	0.300	0.175	552	20.4	2646	1.71	103.5
CAMARON	0.725	0.375	561	20.8	1376	1.93	40.2
GUALLAR	0.325	0.150	464	17.2	1376	2.17	54.0
MUERTE	0.275	0.175	519	19.2	1376	1.57	45.6
PEZ	0.275	0.050	561	20.8	1376	5.50	56.8
PIÑOL	0.325	0.150	519	19.2	1376	2.17	45.6
PITO	1.652	0.350	489	18.1	1376	4.72	49.9
PLAYA	20.520	1.900	489	18.1	1376	10.80	49.9
PUEYO	0.700	0.175	489	18.1	1376	4.00	49.9
REBOLLON	0.900	0.125	561	20.8	1376	7.20	56.8
ROLLICO	0.850	0.300	561	20.8	1376	2.83	40.2
SALADAR	0.775	0.175	584	21.6	1376	4.43	53.6
SALINETA	0.275	0.150	584	21.6	1376	1.83	37.6
SALOBRAL	0.075	0.075	485	17.9	1376	1.00	50.6

(*) Valor estimado para un coeficiente de escorrentía del 3.7%.

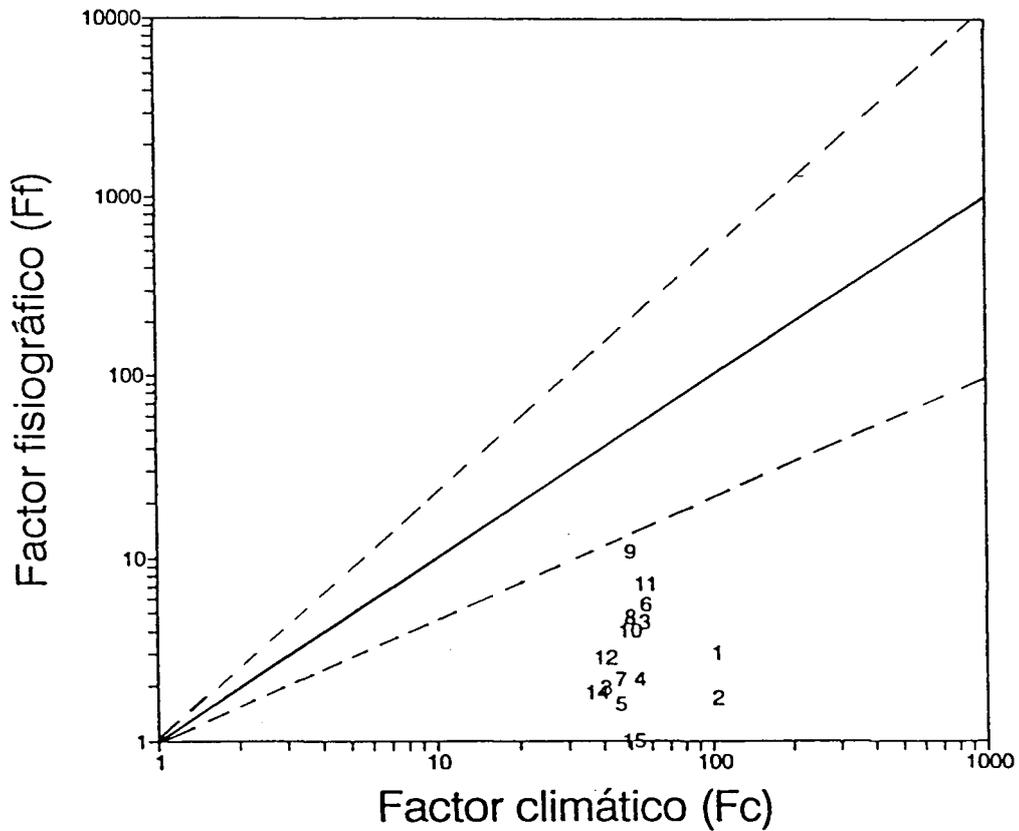


Figura 70. Clasificación hidrológica media de las lagunas de Monegros II durante 1989-1990: 1 = Amarga I; 2 = Amarga II; 3 = Camarón; 4 = Guallar; 5 = Muerte; 6 = Pez; 7 = Piñol; 8 = Pito; 9 = Playa; 10 = Pueyo; 11 = Rebollón; 12 = Rollico; 13 = Saladar; 14 = Salineta; 15 = Salobraf.

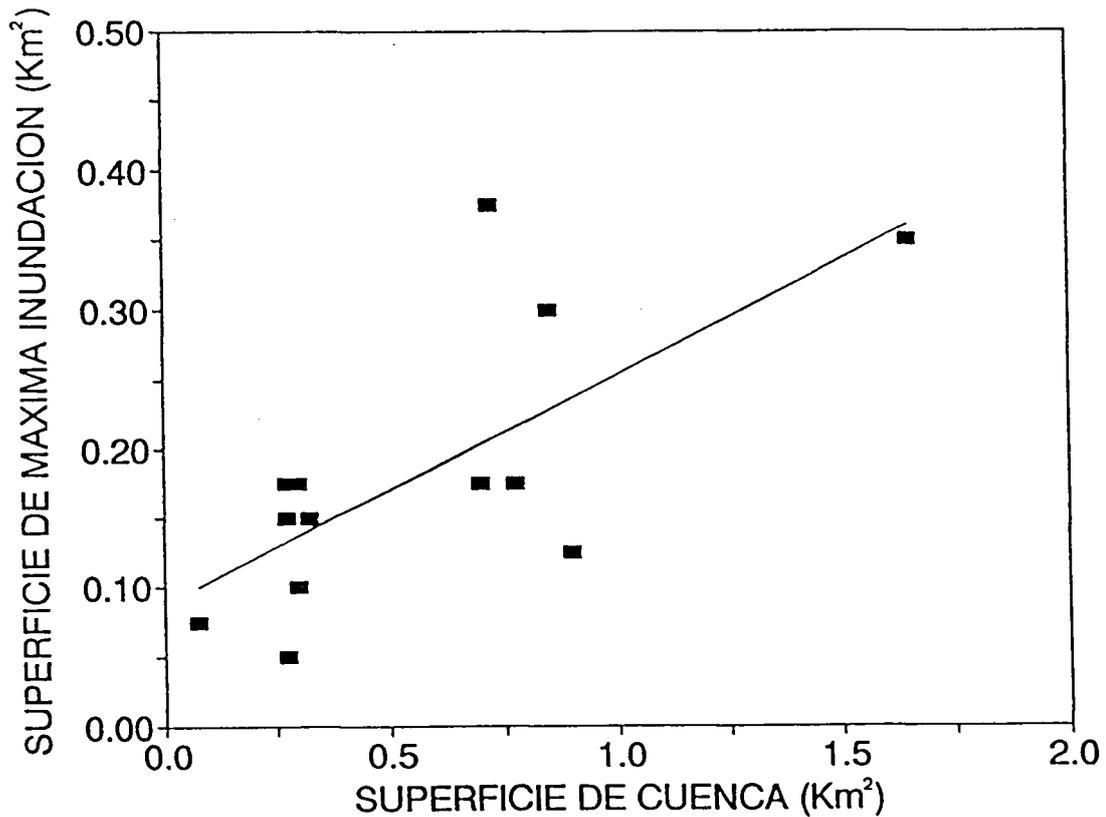


Figura 71. Regresión entre la superficie de máxima inundación (AI, Km²) y la superficie de la cuenca de recepción (Ac, Km²) en quince lagunas de Monegros II.

Las lagunas de La Playa, Rebollón y Pez pueden recibir potencialmente un aporte superficial importante, ya que las superficies de sus cuencas de recepción superan en cinco o más veces a las áreas de máxima inundación. El resto de lagunas tienen una cuenca de recepción entre una y cuatro veces el área de máxima inundación, por lo que la aportación superficial debe ser una componente menos importante del balance hídrico.

Los factores climáticos (F_c) varían entre 37 y 103, valores que indican la importancia de la evaporación potencial sobre el régimen y evolución hídrica de las lagunas. Los valores más elevados de F_c se obtienen en las lagunas en las que no se ha corregido la evaporación y en las que se asignaron los valores de evaporación de la estación de Candanos, que registra los máximos del área de estudio (lagunas Amarga I y II). Los elevados valores de F_c asociados a valores bajos de F_f clasifican a las lagunas en el área de lagos secos o "salt pans" definida por Bowler (Figura 70). Únicamente la laguna de la Playa se encuentra en el límite entre lago seco y lago efímero. Los lagos de dominios climáticos semiáridos poseen valores de F_c entre 20 y 80, mientras que valores por encima de 80 son característicos de dominios climáticos áridos (Bowler, 1981). Si se tienen en cuenta los valores de precipitación y evaporación medios de los últimos 15 años ($P = 340$ mm/año y $E = 1.500$ mm/año), los valores de F_c (93.2) y F_f (3.6, que es el valor medio de la Tabla 64) clasifican asimismo estas zonas endorreicas como lagos secos, indicando que dicha clasificación es típica del área de Monegros II estudiada.

2. Clasificación mensual

Los valores de F_f y F_c deducidos a partir de los datos fisiográficos y climáticos mensuales del período 89-90 se presentan en la Tabla 65. Los meses sin valores de F_f se deben a la ausencia de lámina de agua en la fecha de medida ($Al = 0$). Análogamente, los meses sin valores de F_c se deben a la ausencia de precipitaciones ($P = P' = 0$). Los valores de F_c son negativos en aquellos meses en que la precipitación supera a la evaporación (meses de Enero, Noviembre y Diciembre de 1989) y alcanzan los valores más elevados en los meses en que la evaporación supera ampliamente a la precipitación (meses de Junio, Septiembre y Octubre de 1989 y Agosto de 1990).

En la Figura 72 se representan los meses con valores de F_f y F_c positivo. Puede observarse que las lagunas se sitúan generalmente en las áreas de lagos efímeros y secos y, excepcionalmente, (algunos datos de las lagunas Salineta, Amarga I y II, Playa y Rollico) en el área de lagunas permanentes. Los resultados de la clasificación hidrológica mensual presentan algunas incoherencias aparentes, derivadas de la imposibilidad de representación de las lagunas secas ($Al=0$). Así, puede observarse que la laguna de Salobral queda localizada en el área de las lagunas efímeras a pesar de haber presentado, como se detalla mas adelante, una lámina de agua libre únicamente en 8 de las 46 observaciones mensuales realizadas en el período 1987-1990 y en 2 de las 23 observaciones mensuales del período 88-90.

En base a los valores mensuales de F_f y F_c , las lagunas se clasifican en función del mayor porcentaje de meses en uno u otro grupo, como secas (Muerte y Salineta), efímeras (Guallar, Pez, Pito, Pueyo y Saladar), permanentes (Playa), intermedias entre efímeras y permanentes (Amarga I, Rebollón, Rollico y Salobral) e intermedias entre permanentes y secas (Amarga II, Camarón y Piñol) (Tabla 65). Esta clasificación no es siempre coincidente con la presentada en la Figura 72, pues en ésta no pueden representarse las observaciones con valores negativos de F_c . Es importante resaltar que,

tal como se verá más adelante en el ciclo de llenado y vaciado de las lagunas, algunas lagunas (Salineta, Pito, Pueyo, Playa, Piñol, Muerte y Camarón) mantienen un área inundada durante períodos largos de tiempo, a pesar de que las condiciones climáticas (expresadas por F_c) indiquen un déficit hídrico importante y de que todas ellas, excepto La Playa, se hayan clasificado como lagos secos. Esta aparente incoherencia se justificaría por la existencia de un régimen hídrico más complejo que el planteado en la clasificación de Bowler, tal como posibles aportes subterráneos de agua no contemplados en el cálculo del factor climático de Bowler. Dichos aportes podrían mantener una lámina de agua libre aunque climáticamente (valores de F_c elevados) no existieran razones para ello. Por el contrario, otras lagunas (Guallar, Pez, Saladar, Amarga I y II, Rebollón y Rollico) presentan asimismo áreas inundadas durante períodos de déficit de humedad pero muestran una relación inversa entre la superficie inundada y dicho déficit de humedad (esto es, las áreas inundadas son más reducidas cuanto mayores son los valores de F_c). Ello significaría que la participación de los posibles aportes subterráneos en el régimen hidrológico de estas lagunas es menos relevante que en el caso anterior.

Estas consideraciones son necesariamente cualitativas, ya que no puede descartarse la posibilidad de que las estimaciones realizadas para calcular el factor climático no se ajusten a las condiciones reales de la cuenca (por ejemplo, coeficientes de escorrentía minusvalorados). En definitiva, a pesar de la incertidumbre de los datos climáticos utilizados, los resultados que se presentan en la Figura 72 indican que la correlación positiva que debería presentarse entre los factores fisiográficos y climáticos mensuales de las lagunas (Bowler, 1981) es pobre, lo que permite concluir que la clasificación de Bowler no representa satisfactoriamente el régimen hídrico de las mismas y que es preciso considerar la participación de otros aportes, presumiblemente subterráneos, que justifiquen el comportamiento de estas lagunas.

3. Evolución de las lagunas por efecto del regadío

Los resultados obtenidos considerando unas dotaciones medias de riego de 8.625 m³/ha/año, aplicadas a las superficies de regadío previstas en las cuencas de recepción de cada laguna, se presentan en la Tabla 66 para los diez escenarios hipotéticos detallados en "Material y Metodos". De dicha Tabla se deduce, tal como era de esperar, que los factores climáticos disminuyen significativamente por efecto del riego respecto a los obtenidos en la Tabla 64, llegando a alcanzar valores negativos en algunos supuestos. Por otro lado, se ha calculado para los diez supuestos el incremento potencial de la lámina de agua debido al riego, al objeto de determinar si tal incremento puede conducir a un aumento del área de inundación y, por lo tanto, a una disminución del factor fisiográfico. Los resultados obtenidos indican que dicho incremento es despreciable para los siete primeros supuestos presentados en la Tabla 66, por lo que los valores de F_f de la Tabla 64 permanecen invariables. En la Figura 73 pueden observarse las pequeñas diferencias existentes en los cuatro primeros supuestos con respecto a la Figura 72, mientras que a partir de $C_e = 25\%$, la situación de las lagunas hace que se sitúen en su práctica totalidad como lagos efímeros o permanentes según Bowler. Para los cuatro últimos supuestos, el incremento de altura de la lámina de agua no es despreciable, lo que hace aumentar el área de inundación y origina un descenso en los valores de F_f . La combinación de F_c y estos nuevos valores de F_f clasifican mayoritariamente las lagunas como permanentes.

Tabla 65. Factores fisiográficos y climáticos mensuales de las Lagunas de Monegros en 1989.

LAGUNAS		1-89	2-89	3-89	4-89	5-89	6-89	7-89	8-89	9-89	10-89	11-89	12-89
AMARGA I	F _f	24.0	24.0	48.0	12.0	-	-	-	-	-	-	12.0	48.0
	F _c	-1.4	-	-	-	223.0	-	-	99.7	90.0	404.2	-2.0	12.7
AMARGA II	F _f	5.1	-	-	20.6	-	-	-	-	-	-	20.6	-
	F _c	-1.4	-	-	68.8	223.0	-	-	99.7	90.0	404.2	-2.0	12.7
CAMARON	F _f	7.7	-	7.7	3.9	-	-	-	-	-	15.5	15.5	7.7
	F _c	-23.4	86.4	22.1	30.3	265.2	-	-	73.1	36.0	596.7	-12.4	-8.6
GUALLAR	F _f	4.3	-	4.3	8.7	-	-	-	-	-	-	8.7	8.7
	F _c	-24.6	37.9	22.5	44.2	368.9	1167.3	-	106.6	358.1	-	-12.2	-
MUERTE	F _f	25.1	-	6.3	6.3	-	-	-	-	-	-	3.1	-
	F _c	-22.4	101.7	36.6	41.4	2675.0	-	-	128.3	2690.6	1085.9	-14.0	-3.2
PEZ	F _f	11.0	22.0	44.0	22.0	-	-	-	-	-	-	22.0	11.0
	F _c	-22.7	114.5	34.1	44.4	338.0	-	-	97.9	51.5	752.4	-9.0	-4.3
PIÑOL	F _f	17.3	17.3	8.7	4.3	-	-	-	-	-	-	4.3	-
	F _c	-22.4	75.5	27.4	30.9	1979.8	-	-	95.2	1991.3	803.9	-10.1	-2.1
PITO	F _f	4.7	-	9.4	-	-	-	-	-	-	-	9.4	9.4
	F _c	-23.8	17.2	20.4	35.4	299.8	649.7	-	100.8	91.0	1389.2	-12.3	-0.9
PLAYA	F _f	30.2	15.1	60.4	15.1	30.2	-	-	-	-	-	60.4	120.7
	F _c	-23.8	17.2	20.4	35.4	299.8	649.7	-	100.8	91.0	1389.2	-12.3	-0.9
PUEYO	F _f	8.0	-	8.0	4.0	-	-	-	-	-	-	4.0	4.0
	F _c	-23.8	17.2	20.4	35.4	299.8	649.7	-	100.8	91.0	1389.2	-12.3	-0.9
REBOLLON	F _f	-	-	28.8	14.4	-	-	-	-	-	-	7.2	14.4
	F _c	-22.7	114.5	34.1	44.4	338.0	-	-	97.9	51.5	752.4	-9.0	-4.9
ROLLICO	F _f	-	-	5.7	2.8	-	-	-	-	-	-	5.7	11.3
	F _c	-23.4	86.4	22.1	30.3	265.2	-	-	73.1	36.0	596.7	-12.4	-8.6
SALADAR	F _f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	17.7	17.7
	F _c	-	-	-	57.1	180.2	1643.2	-	95.9	61.7	1271.3	-9.2	11.2
SALINETA	F _f	3.7	3.7	7.3	7.3	11.0	-	-	-	-	18.3	11.0	7.3
	F _c	-	-	-	30.2	103.1	969.2	-	53.2	32.9	749.0	-9.0	3.0
SALOBRAL	F _f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	8.0	-
	F _c	-	-	-	40.5	138.9	1309.4	-	71.6	44.1	1011.8	-12.6	3.8

Tabla 65. (continuación): Factores fisiográficos y climáticos mensuales en 1990 y clasificación hidrológica a partir del porcentaje del total de meses con valores conjuntos de Ff y Fc para 1989-1990 (P = Permanente; E = Efímero; S = Seco).

	1989-1990											CLASIFICACION		
	1-90	2-90	3-90	4-90	5-90	6-90	7-90	8-90	9-90	P	E	S		
AMARGA I	Ff	96.0	96.0	-	-	96.0	-	-	-	-	50	50	-	
	Fc	24.7	-	23.0	40.8	8.9	-	349.3	-	-	-	-	-	
AMARGA II	Ff	-	-	20.6	0.6	10.3	-	10.3	-	-	-	-	-	
	Fc	24.7	-	23.0	40.8	8.9	-	349.3	-	40	20	40	-	
CAMARON	Ff	7.7	15.5	30.9	7.7	-	29.7	-	-	-	30	30	40	
	Fc	6.1	1207.9	205.6	6.8	-	296.2	3230.7	263.9	-	-	-	-	
GUALLAR	Ff	17.3	17.3	34.7	8.7	-	34.7	-	-	-	28.5	43	28.5	
	Fc	16.5	-	388.1	14.9	-	296.2	3230.7	154.4	-	-	-	-	
MUERTE	Ff	25.1	25.1	12.6	6.3	-	6.3	-	-	-	28	15	57	
	Fc	19.2	-	109.3	13.3	31.4	-	296.2	3230.7	-	-	-	-	
PEZ	Ff	11.0	22.0	44.0	-	88.0	-	-	-	-	33	55	12	
	Fc	14.1	1516.4	263.5	15.0	-	376.8	4044.9	336.4	-	-	-	-	
PIÑOL	Ff	8.7	17.3	17.3	34.7	-	8.7	-	-	-	37.5	25	37.5	
	Fc	14.5	-	81.1	10.1	23.5	-	219.5	2391.0	154.9	-	-	-	
PITO	Ff	18.9	37.8	75.5	18.9	-	18.9	-	-	-	37.5	50	12.5	
	Fc	21.3	497.5	93.8	29.6	33.3	-	296.2	3230.7	-	-	-	-	
PLAYA	Ff	120.7	241.4	-	241.4	-	241.4	-	-	-	50	40	10	
	Fc	21.3	497.5	93.8	29.6	33.3	-	296.2	3230.7	-	-	-	-	
PUEYO	Ff	8.0	16.0	32.0	16.0	-	8.0	-	-	-	33	45	22	
	Fc	21.3	497.5	93.8	29.6	33.3	-	296.2	3230.7	-	-	-	-	
REBOLLON	Ff	14.4	28.8	57.6	57.6	-	57.6	-	-	-	37.5	37.5	25	
	Fc	14.1	1516.4	263.5	15.0	-	376.8	4044.9	336.4	-	-	-	-	
ROLLICO	Ff	11.3	22.7	45.3	45.3	-	45.3	-	-	-	37.5	37.5	25	
	Fc	6.1	1207.9	205.6	6.8	-	296.2	3230.7	263.9	-	-	-	-	
SALADAR	Ff	35.4	35.4	17.7	8.9	-	8.9	-	-	-	17	50	33	
	Fc	29.8	1937.1	149.2	22.4	49.0	-	376.8	4044.9	182.5	-	-	-	
SALINETA	Ff	18.3	18.3	7.3	3.7	-	3.7	-	-	-	16.5	16.5	67	
	Fc	14.1	1143.2	84.7	9.7	25.4	-	219.5	2391.0	104.4	-	-	-	
SALOBRAL	Ff	-	-	-	16.0	-	-	-	-	-	50	50	-	
	Fc	18.7	1544.5	114.1	12.7	34.0	-	296.2	3230.7	140.8	-	-	-	

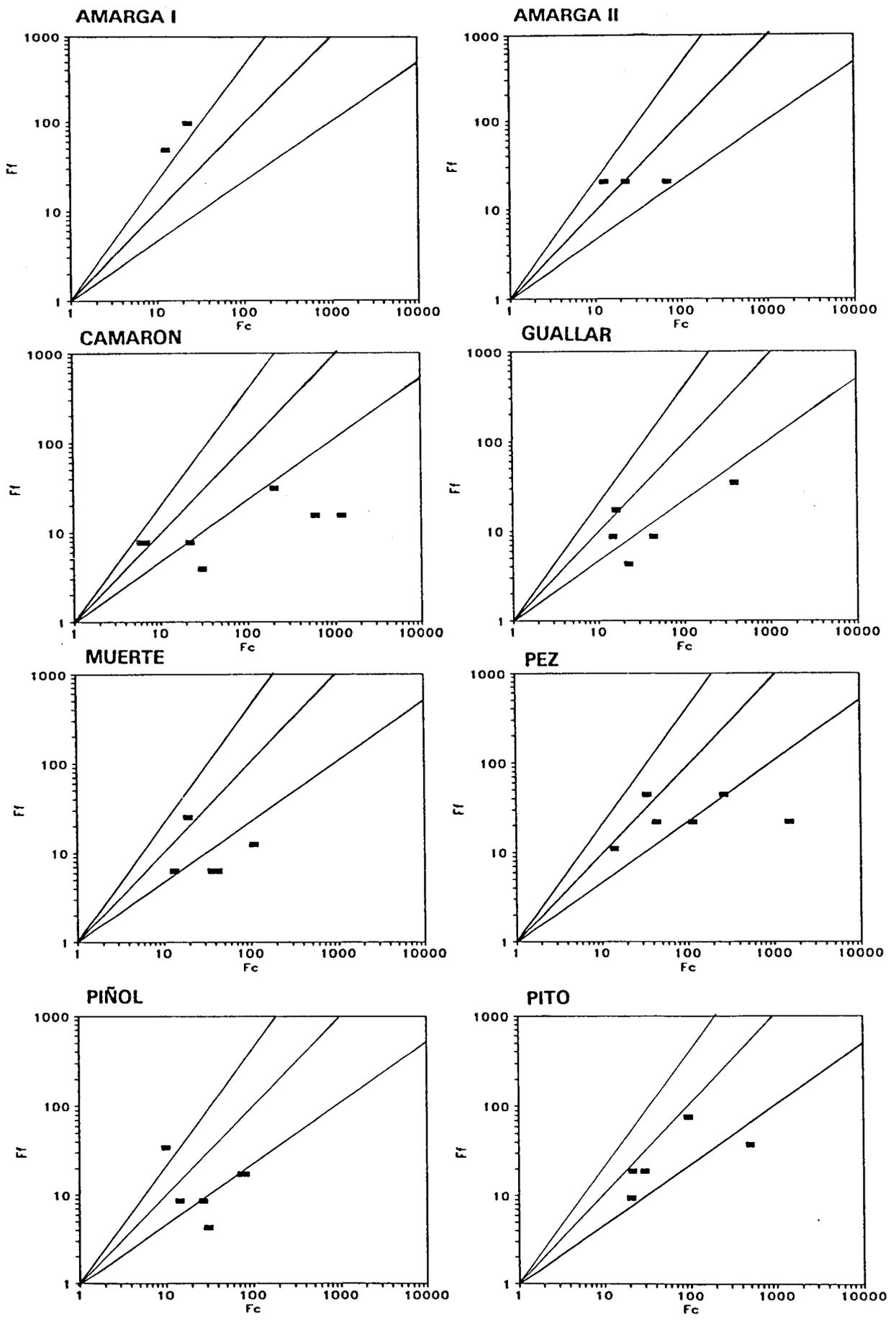


Figura 72. Clasificación hidrológica mensual de las principales lagunas de Monegros.

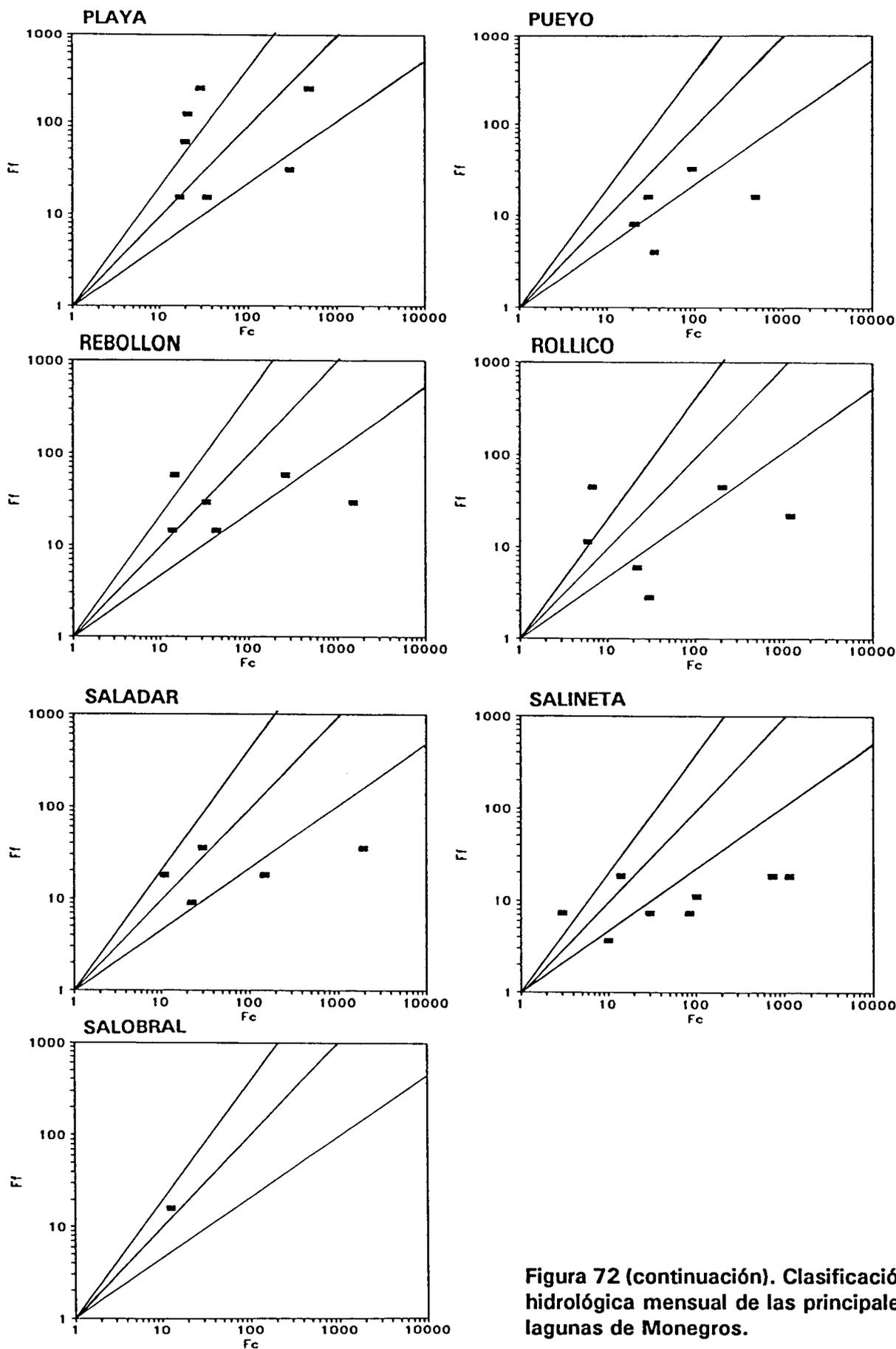


Figura 72 (continuación). Clasificación hidrológica mensual de las principales lagunas de Monegros.

A nivel práctico, el efecto del regadío sobre las áreas de inundación de las diferentes lagunas se ha estimado considerando un volumen de agua de riego de 8.625 m³/ha y dos eficiencias hipotéticas del riego del 60% y 80%. La eficiencia de riego se define como el porcentaje del agua de riego que es evapotranspirada por los cultivos, por lo que en régimen permanente el volumen de agua que va a percolación profunda sería de 3.450 y 1.725 m³/ha para las eficiencias del 60% y 80%, respectivamente. Teniendo en cuenta las características geológicas de las zonas endorreicas, se presentan dos escenarios hipotéticos que consideran que el 90% y el 70% del volumen de percolación profunda va a inundar las áreas de cota más baja de las lagunas. En definitiva, se contemplan cuatro escenarios hipotéticos, según los cuales el volumen de agua susceptible de acumularse en las lagunas es de 3.105 y 2.415 m³/ha (para una eficiencia del riego del 60% y retornos del 90 y 70%) y 1.553 y 1.208 m³/ha (para una eficiencia del riego del 80% y retornos del 90 y 70%). Los volúmenes recibidos por cada laguna en cada uno de los cuatro supuestos figuran en la Tabla 67. Teniendo en cuenta la superficie de riego prevista en la cuenca vertiente de cada laguna y aforando el volumen de las lagunas (a partir de las curvas de nivel), se obtienen las superficies de inundación que se presentan en la Tabla 68. En esta Tabla se presentan también las superficies actuales de máxima inundación en cada laguna y los incrementos de superficie previstos para cada uno de los escenarios examinados.

Puede apreciarse que en el 50 % de las lagunas los incrementos de superficie son poco importantes (< 10%) en cualquiera de los cuatro supuestos. Para el supuesto de máximos retornos a las lagunas ($E_r = 60\%$ y $R_e = 90\%$), el 21% de las lagunas sufren unos incrementos de superficie superiores al 100% respecto a sus superficies de máxima inundación en el régimen actual de secano.

Las lagunas de Pez, Rebollón y Saladar presentan los máximos incrementos de superficie inundada en cualquiera de los cuatro supuestos, mientras que el mínimo incremento corresponde a las lagunas Amarga II y Muerte.

Debe considerarse, por otro lado, que estas ampliaciones de las áreas inundadas podrían conducir a la inversión del gradiente hidráulico de los niveles piezométricos conectados a las lagunas afectando, en consecuencia, al funcionamiento hidrodinámico del sistema y a los ciclos de llenado y vaciado de las lagunas.

Los efectos de la ampliación del área inundada dependen tanto del incremento respecto del área inundada actual como de que dichos incrementos sean temporales o crecientes en el tiempo debido al riego permanente en las cuencas de recepción de las lagunas. Ello depende lógicamente del balance entre agua aportada por el riego a la laguna en cada estación de riego y de la capacidad de evaporación del agua en las nuevas superficies inundadas. El volumen que puede evaporarse potencialmente en las lagunas durante el período de riego (típicamente Abril a Septiembre) se presenta en la Tabla 67, junto con los excedentes de riego que llegan a las lagunas en los cuatro supuestos establecidos anteriormente. Puede observarse que los volúmenes de agua potencialmente evaporables son superiores a los excedentes del regadío que se almacenan en la laguna, por lo que debe inferirse que las áreas de inundación no se incrementarían en el tiempo.

Hay que recalcar sin embargo que el ciclo natural de estas lagunas exige un período de sequedad (más o menos amplio) que se vería notablemente alterado con el regadío, ya que el período seco en las lagunas, actualmente coincidente con los meses de verano, sería sustituido por un período húmedo, pues el agua procedente del regadío iría a las lagunas entre los meses de Abril a Octubre. Finalmente, debe considerarse que la transformación generalizada del área a regadío puede disminuir sensiblemente la ET potencial, por lo que los resultados obtenidos deben considerarse tan sólo como una primera aproximación al problema planteado.

Tabla 66. Factores climáticos de 15 lagunas estimados para la situación de regadío con diez supuestos que contemplan dos tasas de infiltración (Cs) y cinco coeficientes de escorrentía (Ce).

LAGUNAS	Ce = 0.037			Ce = 0.05			Ce = 0.25			Ce = 0.50			Ce = 0.90		
	Cs = 5%		Cs = 15%	Cs = 5%		Cs = 15%	Cs = 5%		Cs = 15%	Cs = 5%		Cs = 15%	Cs = 5%		Cs = 15%
AMARGA 1	13.4	12.2	10.2	9.2	2.8	2.4	1.9	1.6	1.5	1.3					
AMARGA 2	21.2	20.0	15.1	14.8	3.8	3.5	2.4	2.0	1.8	1.5					
CAMARON	8.6	7.0	6.6	5.4	2.1	1.7	1.6	1.3	1.3	1.1					
GUALLAR	15.6	13.6	11.8	11.2	3.2	2.9	2.1	1.8	1.6	1.3					
MUERTE	13.9	12.4	10.5	10.3	2.9	2.6	2.0	1.7	1.5	1.3					
PEZ	6.6	4.5	5.1	3.6	1.8	1.4	1.4	1.2	1.2	1.1					
PIÑOL	8.6	7.0	6.7	5.4	2.1	1.7	1.6	1.3	1.3	1.1					
PITO	1.1	-1.5	1.0	-0.9	1.0	0.7	1.0	0.9	1.0	0.9					
PLAYA	-0.2	-2.8	0.1	-1.8	0.8	0.5	0.9	0.8	0.9	0.9					
PUEYO	3.5	1.0	2.9	1.0	1.4	1.0	1.2	1.0	1.1	1.0					
REBOLLON	1.8	-0.8	1.6	-0.3	1.1	0.8	1.1	0.9	1.0	1.0					
ROLLICO	2.7	0.1	2.3	0.4	1.3	0.9	1.1	1.0	1.1	1.0					
SALADAR	2.4	-0.2	2.0	0.1	1.2	0.9	1.1	0.9	1.1	1.0					
SALINETA	10.7	10.2	8.2	7.7	2.4	2.1	1.7	1.5	1.4	1.2					

Tabla 67: Efecto del regadío sobre las áreas de inundación: volumen de agua (m³) que se almacena en la laguna y volumen potencialmente evaporable (m³) para cuatro escenarios hipotéticos de regadío.

LAGUNA		Er = 60		Er = 80	
		Re = 90	Re = 70	Re = 90	Re = 70
AMARGA I	Vriego	62.100	48.300	31.060	24.160
	Vevap	166.221	162.528	158.358	155.845
AMARGA II	Vriego	38.812	30.187	19.412	15.100
	Vevap	266.137	265.210	264.098	155.845
CAMARON	Vriego	52.164	40.572	26.090	20.294
	Vevap	489.834	487.855	485.355	484.370
GUALLAR	Vriego	29.187	22.701	14.598	11.355
	Vevap	196.680	195.615	194.419	193.622
MUERTE	Vriego	31.050	24.150	15.530	12.080
	Vevap	228.011	227.191	225.950	225.757
PEZ	Vriego	69.862	54.338	34.942	27.180
	Vevap	130.130	117.024	99.716	92.623
PIÑOL	Vriego	54.338	42.262	27.178	21.140
	Vevap	205.163	202.175	198.460	196.830
PITO	Vriego	403.650	313.950	201.890	157.040
	Vevap	601.051	569.307	527.890	511.177
PLAYA	Vriego	479.722	373.117	239.938	186.636
	Vevap	2.564.033	2.536.489	2.501.658	2.487.281
PUEYO	Vriego	141.277	109.882	70.661	54.964
	Vevap	286.384	273.149	256.192	249.164
REBOLLON	Vriego	240.637	187.162	120.357	93.620
	Vevap	400.709	373.746	338.686	324.169
ROLLICO	Vriego	170.775	132.825	85.415	66.440
	Vevap	479.564	459.259	433.371	422.835
SALADAR	Vriego	186.300	144.900	93.180	72.480
	Vevap	458.842	411.851	351.679	327.112
SALINETA	Vriego	38.812	30.187	19.412	15.100
	Vevap	206.165	202.930	198.893	197.248

Tabla 68: Efecto del regadío sobre las áreas de inundación (m²) de quince lagunas de Monegros II. Los escenarios hipotéticos considerados son: Vriego = 8.625 m³/ha; Eficiencia de riego (Er) = 80 y 60%; Retorno a la laguna del agua de percolación profunda (Re) = 90 y 70%.

LAGUNA	SUPERFICIE MAXIMA INUNDACION m ²	SUPERFICIE DE Regadío m ²	Er = 60%				Er = 80%			
			Re = 90%		Re = 70%		Re = 90%		Re = 70%	
			m ²	Incrmtó %						
Amarga I	100.000	200.000	111.036	11,00	108.569	8,00	105.784	5,00	104.105	4,10
Amarga II	175.000	125.000	177.778	1,60	177.161	1,20	176.418	0,80	176.059	0,60
Camarón	375.000	168.000	382.086	1,90	380.542	1,50	378.592	0,95	377.829	0,75
Guallar	150.000	94.000	153.417	2,20	152.586	1,70	151.653	1,10	151.031	0,80
Muerte	175.000	100.000	177.856	1,60	177.216	1,30	176.428	0,80	176.098	0,60
Pez	50.000	225.000	101.506	103,00	91.284	82,00	77.782	55,00	72.249	44,00
Piñol	150.000	175.000	160.134	6,60	157.703	5,10	154.805	3,20	153.534	23,00
Pito	350.000	1.300.000	468.839	3,40	444.077	26,80	411.771	17,60	398.734	14,00
Playa	1.900.000	1.545.000	2.000.02	5,20	1.978.541	4,10	1.951.372	2,70	1.940.157	2,10
Pueyo	175.000	455.000	223.389	27,60	213.065	21,70	199.838	14,20	194.356	11,00
Rebollón	125.000	775.000	312.566	150,00	291.534	133,00	264.186	111,00	252.862	102,00
Rollico	300.000	550.000	374.075	24,00	358.237	19,40	338.043	12,60	329.825	9,90
Saladar	175.000	600.000	357.911	104,00	321.257	83,00	274.321	56,70	255.158	45,20
Salineta	150.000	125.000	160.815	7,70	158.292	5,50	155.143	3,40	153.860	2,50
Salobral	--	0	--	--	--	--	--	--	--	--

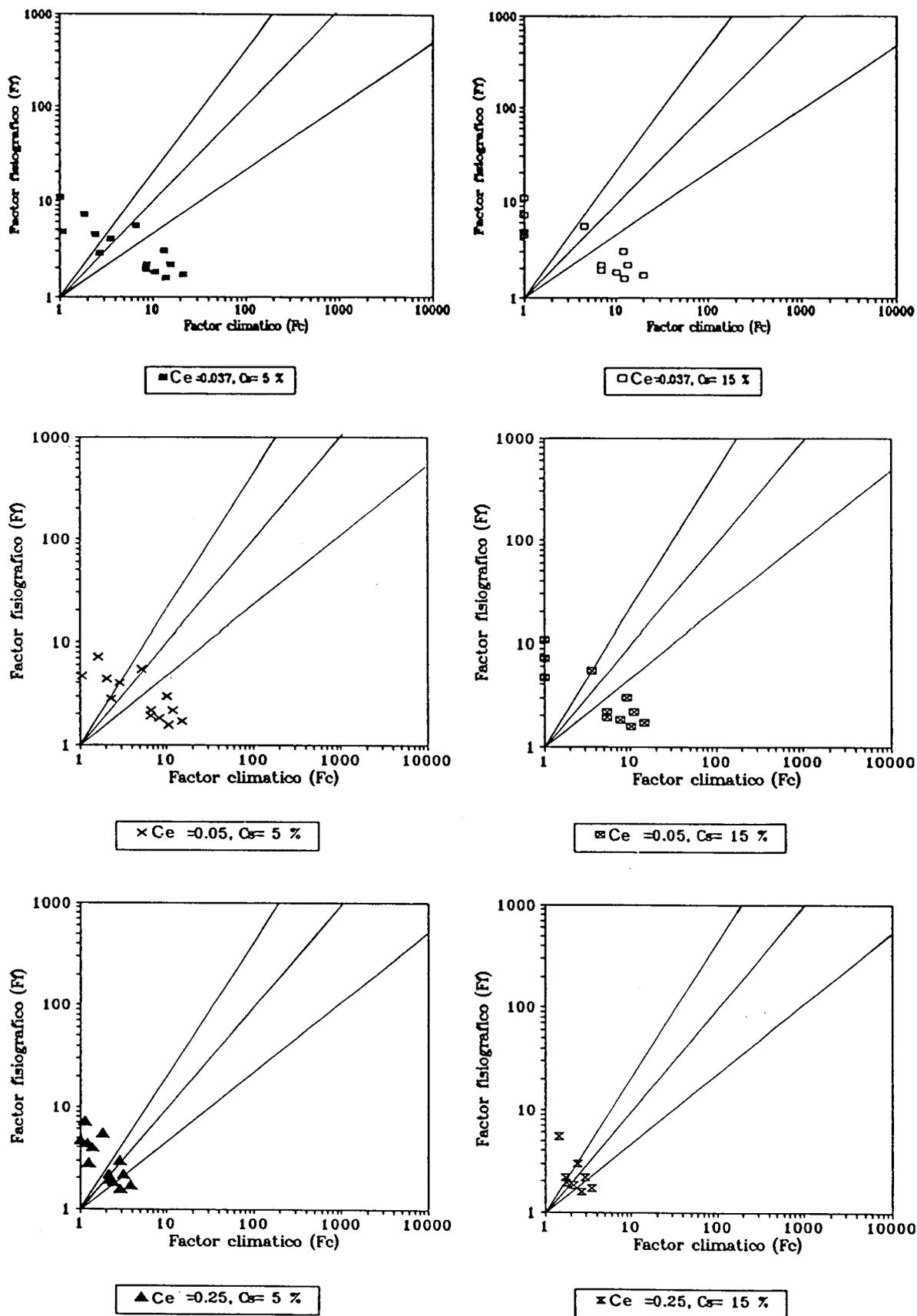


Figura 73. Clasificación hidrológica bajo diez supuestos de riego para quince lagunas de Monegos.

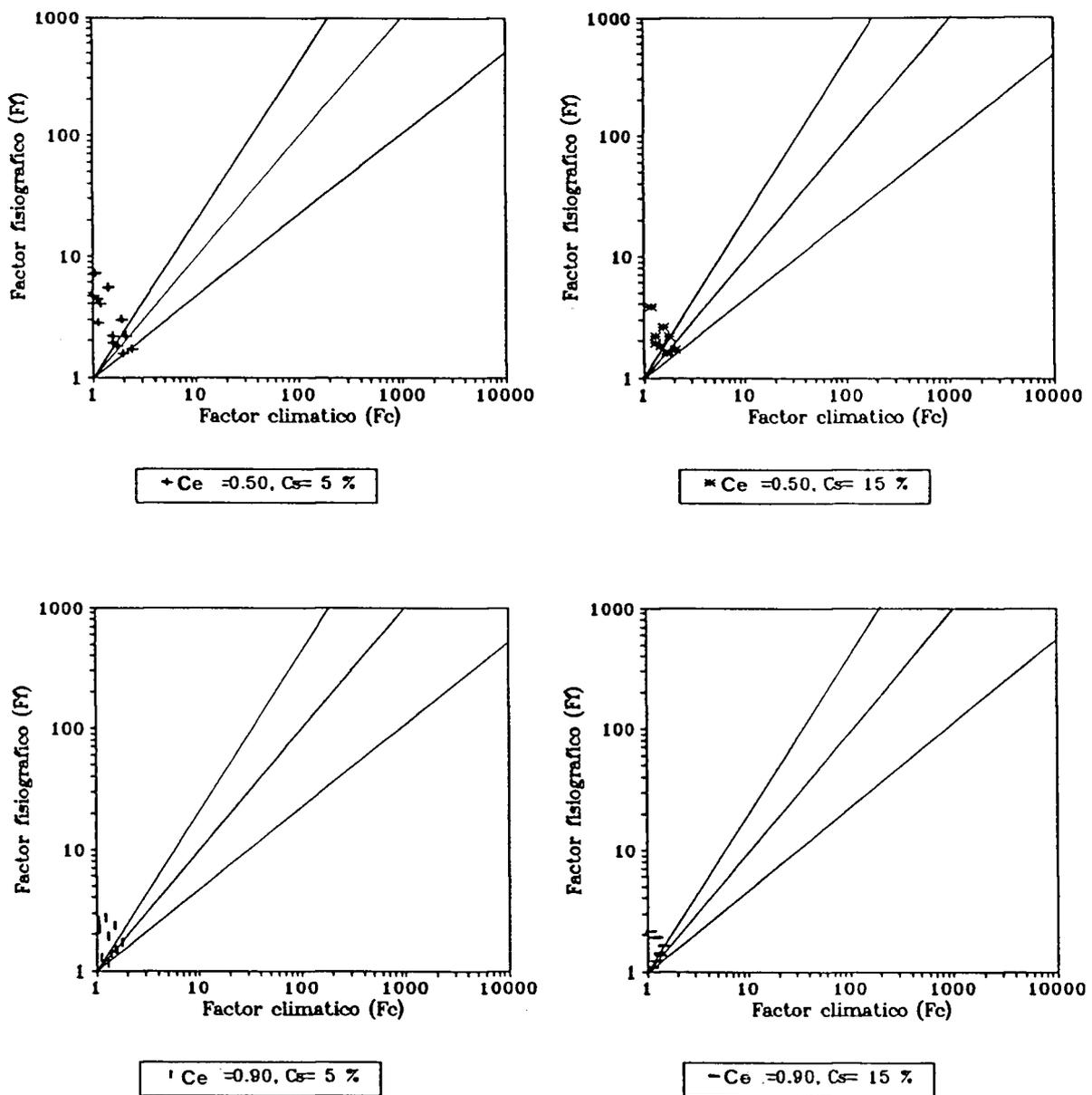


Figura 73 (continuación). Clasificación hidrológica bajo diez supuestos de regadío para quince lagunas de Monegros.

4. Ciclos de llenado y vaciado de las lagunas.

Las observaciones de presencia o ausencia de agua en las lagunas, realizadas en la primera semana de los meses de Enero de 1987 a Septiembre de 1990, figuran en el Anexo 10 y se resumen en la Tabla 69.

Tabla 69. Porcentaje del total de meses con presencia de agua almacenada en quince lagunas de Monegros II.

LAGUNA	1987 N=12	1988 N=12	1989 N=12	1990 N=9
AMARGA I	42	50	50	44
AMARGA II	83	58	25	56
CAMARON	58	75	50	33
GUALLAR	50	58	50	56
MUERTE	50	75	42	56
PEZ	50	58	50	44
PIÑOL	92	66	42	56
PITO	75	66	33	56
PLAYA	100	100	58	44
PUEYO	66	75	33	56
REBOLLON	50	66	33	56
ROLLICO	50	75	33	56
SALADAR	25	66	16	11
SALINETA	100	100	66	56
SALOBRAL	25	25	8	11

Estas observaciones permiten dividir las lagunas en dos grupos cuyos períodos con presencia de agua son superiores o inferiores a seis meses por año durante el período de seguimiento. El primer grupo lo constituyen las lagunas Salineta, Playa y Guallar. Este grupo se caracteriza por presentar un comportamiento interanual homogéneo en el que el comienzo del llenado de la laguna se realiza en otoño y se prolonga hasta Marzo, aunque en ocasiones se ha mantenido todo el año (Salineta y Playa, 1987 y 1988). El segundo grupo, constituido por el resto de las lagunas, tiene por el contrario un comportamiento interanual más heterogéneo. La construcción de una gráfica (Figura 74) con los ciclos de llenado y vaciado de las lagunas desde 1987 hasta 1990 permite conocer la duración del ciclo húmedo de cada laguna y apoya la clasificación hidrológica de lagos efímeros (80 % de las lagunas) discutida con anterioridad. Sólo Saladar y Salobral constituyen una excepción, ya que tienen áreas inundadas menos de seis meses al año en 1987 y 1989.

No se ha obtenido una correlación significativa entre la duración del ciclo húmedo de cada laguna y las superficies de sus cuencas de recepción ($r < 0.25$) o entre dicha duración y las superficies de máxima inundación ($r < 0.30$), lo que estaría en contradicción con lo afirmado por Quirantes (1965) acerca de un comportamiento hídrico distinto de las lagunas según su tamaño. La relación entre la precipitación anual medida en las lagunas y la duración del ciclo húmedo se presenta en la Figura 75.

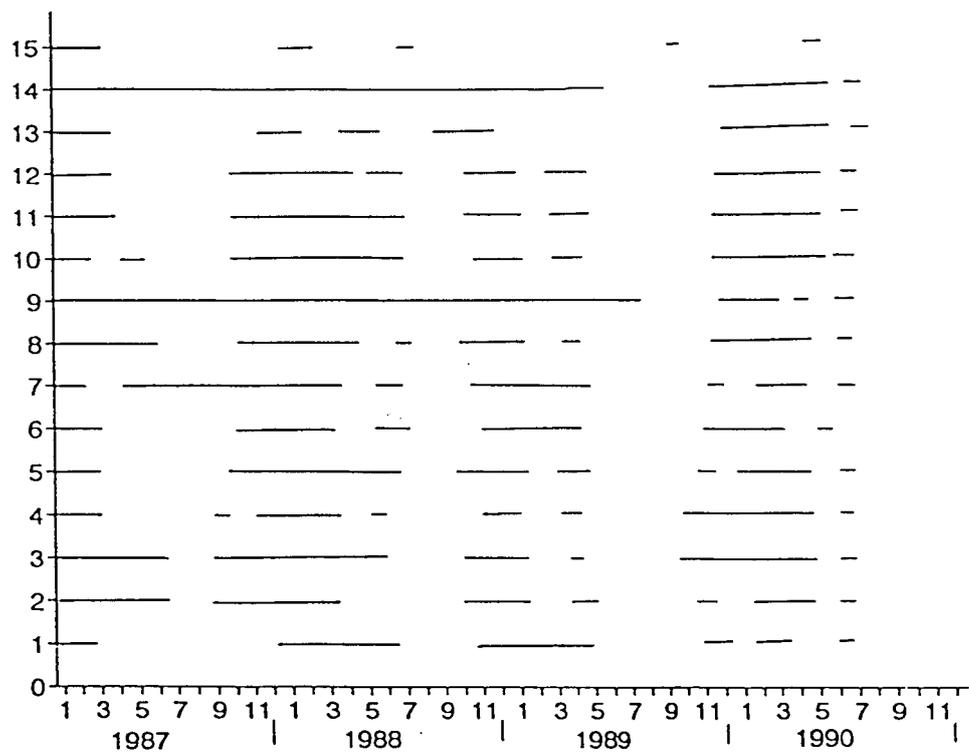


Figura 74. Ciclos de llenado y vaciado de las lagunas: duración de los períodos secos (en blanco) y húmedos (líneas sólidas) en quince lagunas durante el período Enero 87 a Septiembre 90.

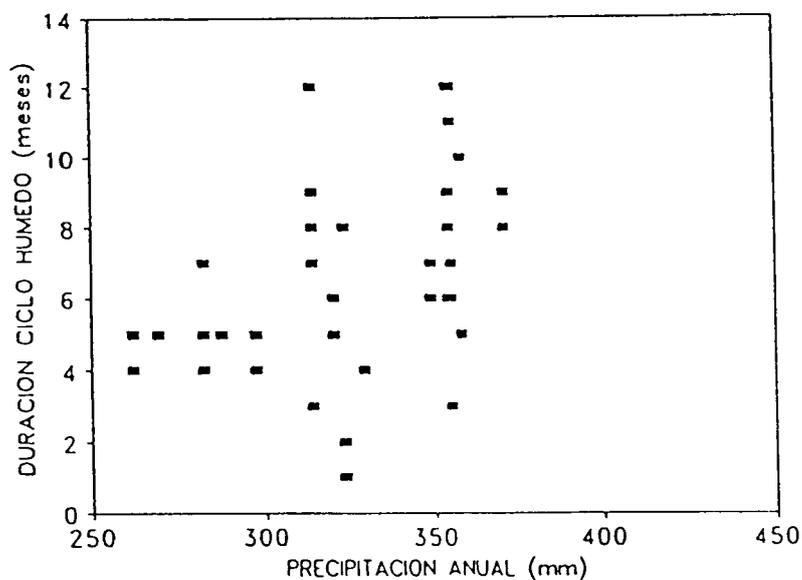


Figura 75. Regresión entre la precipitación anual (mm) y la duración del ciclo húmedo de las lagunas de Monegros.

La evidente ausencia de correlación entre estas dos variables indica que la precipitación "per se" no explica satisfactoriamente la presencia/ausencia de agua en las lagunas, lo que sugiere de nuevo la existencia de otros componentes subsuperficiales del régimen hídrico.

Cuando las precipitaciones de invierno son intensas (como en 1986 y 1987) la presencia de agua libre en las lagunas se mantiene durante períodos de tiempo relativamente elevados, mientras que cuando las lluvias no son muy intensas y están distribuidas en el tiempo (como en 1989), la existencia de superficies inundadas se reduce a semanas. Las lluvias de primavera, incluso cuando igualan en volumen a las de otoño (Tabla 8, Anexo 1), no son capaces de mantener el agua en las lagunas durante tanto tiempo como las lluvias de invierno. Así, es frecuente que el ciclo seco se inicie en Mayo-Junio (Anexo 10), inmediatamente después de las lluvias de primavera, período en el que, por otra parte, se empieza a producir un incremento paulatino y significativo de la evaporación.

Balance hídrico

En las Tablas 1 a 15 del Anexo 11 figuran los resultados de los balances efectuados en cada laguna durante el período 89-90. De la observación de estas Tablas se deduce que los balances 1, 2, 3 y 4 son mayoritariamente negativos (un mínimo de 15 meses sobre 21 con déficit de agua). El balance 1, con los mayores coeficientes de escorrentía (25, 50 y 90%) e infiltración (25%), llega a alcanzar un mínimo de 9 meses y un máximo de 18 meses con déficit de humedad. Los meses en los que predice la existencia de agua son mayoritariamente Octubre, Noviembre y Diciembre de 1989.

De la comparación de los resultados de los balances con la presencia o ausencia de lámina de agua libre (columna segunda de las Tablas del Anexo 11), puede deducirse que los resultados del balance no coinciden totalmente con las observaciones de campo. Así, aunque el código 0 (ausencia de agua) va siempre asociado a un valor negativo en los balances 1 ($C_e = 0.037$, $C_s = 0.05$ y 0.15), 2, 3 y 4, gran parte de los meses en los que el balance es asimismo negativo se asocia con presencia de agua en las lagunas (código 1). Por el contrario, cuando el balance predice superávit de humedad, las observaciones de campo indican también presencia de agua en la laguna (código 1).

En definitiva, el porcentaje de coincidencia de las observaciones de campo con los distintos balances (Tabla 70) osciló entre el 43% (Salineta) y el 95% (Salobral). En algunas lagunas (Guallar y Pueyo) se observa un incremento del porcentaje de coincidencia a medida que se incrementan los coeficientes de escorrentía e infiltración, ya que los balances se hacen más positivos, pero en la mayoría de las lagunas el incremento de coincidencia no es relevante ya que, a pesar de los elevados coeficientes de escorrentía e infiltración, los balances no revierten a positivos. Además, hay ocasiones en que la utilización de dichos coeficientes origina que los balances negativos que coincidían con el código 0 reviertan a positivos, lo que en definitiva produce un descenso final en el grado de concordancia. En conclusión, el porcentaje de coincidencia medio para las quince lagunas (última fila de la Tabla 70) es muy parecido para los distintos balances, con una horquilla de valores entre el 63% (Balance 4) y el 70% (varios supuestos del Balance 1).

Estos resultados indican que los componentes incluidos en los balances forman parte del funcionamiento hídrico de las lagunas y que la proporción en que lo hacen puede ser próxima a alguna de las situaciones planteadas, ya que los porcentajes de coincidencia de determinadas lagunas son muy elevados.

Por el contrario, la existencia de agua en las lagunas en los períodos en los que todos los balances contemplados son negativos debe ser interpretada una vez más como debida a la participación de otros componentes subsuperficiales y/o subterráneos no incluidos en los mismos.

En conclusión, los resultados de estos balances indican que con las entradas y salidas consideradas, no deberían existir superficies inundadas en las lagunas, salvo en los meses reseñados en cada caso. La falta de concordancia entre los datos estimados y observados puede atribuirse a diferentes causas entre las que cabe resaltar:

1) Sobreestimación de la evaporación. Algunos autores (Salhotra et al., 1987) sugieren que, para las mismas condiciones meteorológicas, la evaporación del agua en un tanque clase A es superior a la que se produce en un lago, y aplican un coeficiente de 0.7 para estimar la segunda a partir de la primera. Dicha corrección no se ha aplicado en este trabajo, pues la evaporación se estimó, salvo en dos lagunas, a partir de los datos del tanque instalado en Valfarta, rodeado de una hierba regada y donde los fenómenos de advección son, por lo tanto, menos significativos que los de otros trabajos. La sobreestimación por esta causa, en caso de producirse, no puede ser muy relevante.

Una segunda causa por la que ha podido sobreestimarse la evaporación de las lagunas es que el aumento de la concentración salina de las aguas lagunares debido a fenómenos de evapoconcentración disminuye progresivamente la evaporación, por lo que el volumen de agua evaporada en las lagunas podría ser menor que el 80% de la E del tanque A considerado en los balances. Sin embargo, estas diferencias no pueden ser tampoco muy relevantes, ya que frente al efecto reductor de la evaporación debido al aumento de la concentración salina, se presenta el efecto derivado del aumento de la temperatura del agua conforme se incrementa su salinidad, que compensa parcialmente el efecto reductor mencionado anteriormente ("temperature feedback effect", Salhotra et al., 1987). Así, estos autores obtienen unos coeficientes reductores de 0.74 a 0.87, esto es, similares al valor de 0.80 utilizado en nuestros balances, excepto para las aguas del Mar Muerto, extraordinariamente salinas, donde dicho coeficiente es de 0.63.

2) Infraestimación del volumen de agua superficial que reciben las lagunas. Esta consideración es difícilmente justificable, ya que incluso en las simulaciones con escurrimientos entre el 25 y el 90%, extraordinariamente sobrevaloradas, no se logra una coincidencia de resultados satisfactoria.

3) Infraestimación del volumen de agua subsuperficial que reciben las lagunas. Los comentarios del apartado anterior se hacen extensivos a esta consideración, ya que se han aplicado porcentajes de retorno de hasta el 25%, que deben considerarse elevados teniendo en cuenta las altas demandas evaporativas de la zona.

El uso de valores fijos de coeficientes de escurrimiento y de infiltración para todo el período 89-90 implica que se ha asumido que todas las precipitaciones del período

estudiado dan lugar a las mismas escorrentías e infiltraciones. Evidentemente, esta asunción es errónea, pero simplifica los balances cuando se aplican a cuencas con una gran variabilidad de comportamientos y en las que los coeficientes de partida se han obtenido para un área y condiciones climáticas concretas que no representan necesariamente la elevada variabilidad espacial y temporal de Monegros II.

Las observaciones de campo en relación con la escorrentía indican que ésta es muy variable en el tiempo y el espacio. Las lagunas de Salineta, Playa, Piñol y Camarón han presentado signos de arroyada después de lluvias intensas (porcentajes de escorrentía al menos del 5%). Las lagunas cuyas cubetas son redondeadas y presentan un desnivel casi vertical como límite, caso de las lagunas de Pez, Guallar, Amarga II, Muerte, Pito y Rebollón, no presentan por el contrario ningún signo de escorrentía, por lo que probablemente los coeficientes utilizados han sido sobrevalorados. De hecho, los valores de los factores climáticos obtenidos con estos coeficientes de escorrentía (apartado "Clasificación hidrológica") no se han obtenido en ningún caso en las lagunas durante el período 1988-1990.

4) Existencia de aportes subterráneos no contabilizados en los balances. Esta aportación permitiría compensar las pérdidas por evaporación en invierno y primavera, e incluso en algunas lagunas (Salineta y Playa) y determinados años (1987 y 1988) compensaría asimismo las importantes pérdidas por evaporación que se producen en los meses de verano.

Todos los resultados obtenidos en este capítulo apuntan a la existencia de dichos flujos subterráneos, por lo que a continuación se efectúa una primera aproximación a la cuantificación de los mismos. Para ello, se ha considerado que la aportación subterránea debe equivaler como mínimo al déficit hídrico estimado por los balances cuando las observaciones de campo indican presencia de lámina de agua (código 1). Se considera que este valor es el mínimo porque el código 1 implica existencia de agua en la laguna. Este volumen de agua en la laguna ha sido difícil de cuantificar, debido a los problemas ya comentados de lectura en las escalas instaladas. Aun así, el código 1 implica que la lámina de agua debe ser ≥ 5 cm por lo que, multiplicando esta cifra por la superficie inundada mensual, puede aproximarse el valor mínimo de agua embalsada en la laguna. Sumando este volumen al volumen de déficit hídrico estimado en los balances, se obtiene una aproximación al límite inferior de la componente subterránea.

En la Tabla 71 se presenta para cada laguna el valor del déficit hídrico que debe ser compensado por flujos subterráneos en los quince supuestos planteados. Los déficits máximos corresponden al balance 4 y presentan una horquilla de valores desde 0.893 Dm^3 (año 89, Saladar) hasta 1.056 Dm^3 (año 89, Playa). Los déficits mínimos corresponden al balance 1 con $C_e = 0.9$ y $C_s = 0.25$ y presentan una horquilla de valores desde 0 Dm^3 (lagunas de Pez, Pito, Pueyo y Saladar en el año 89) hasta 658 Dm^3 (laguna de La Playa en el año 90). En el resto de supuestos, los déficits hídricos se encuentran entre estos valores mínimos y los máximos del balance 4. El hecho de que, en general, el déficit hídrico en 1989 sea menor que en 1990 implica que este último año fue más seco. Esta observación se ve confirmada por los resultados obtenidos respecto a valores de P, E, y períodos de humedad en dichos años.

Tabla 70. Porcentaje de coincidencia entre las observaciones de campo (1 = presencia y 0 = ausencia de lámina de agua) y los resultados de los balances hídricos (+ con 1 y - con 0).

LAGUNA	BALANCE 1												BALANCE 2		BALANCE 3	BALANCE 4
	Ce = 0,037			Ce = 0,25			Ce = 0,50			Ce = 0,90			Ce = 0,037			
	Cs = 0,06	Cs = 0,15	Cs = 0,06	Cs = 0,15	Cs = 0,26	Cs = 0,06	Cs = 0,15	Cs = 0,26	Cs = 0,06	Cs = 0,15	Cs = 0,26	Cs = 0,06	Cs = 0,15			
AMARGA 1	67	67	67	62	67	67	67	67	62	62	62	67	67	62	57	
AMARGA 2	67	76	76	76	76	76	76	76	76	71	71	67	76	67	67	
CAMARON	62	62	62	62	62	67	71	71	71	71	71	62	62	62	62	
GUALLAR	62	62	62	62	62	62	62	62	71	71	76	62	62	62	62	
MUERTE	67	62	62	62	62	62	62	62	62	62	62	67	62	62	62	
PEZ	67	67	71	76	71	71	71	71	71	71	71	67	67	67	67	
PIÑOL	57	57	57	57	57	57	57	57	62	62	62	57	57	62	62	
PITO	71	71	67	71	71	71	71	71	71	71	71	71	71	67	67	
PLAYA	62	76	81	81	81	81	81	81	67	67	67	62	62	62	57	
PUEYO	67	67	67	71	71	76	76	76	76	76	76	62	67	62	62	
REBOLLON	71	71	81	76	76	76	71	67	67	67	67	62	71	62	62	
ROLLICO	62	62	71	71	71	71	71	76	76	71	71	62	62	62	62	
SALADAR	71	76	76	81	81	76	76	71	71	67	67	71	76	71	71	
SALINETA	43	43	43	43	48	48	48	48	48	48	48	43	43	43	43	
SALOBRAL	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95	
MEDIA	66	68	69	70	70	70	70	70	70	70	69	65	67	64	63	

Tabla 71. Déficit hídricos (m3) de las lagunas, deducidos de los balances de los balances que deben ser compensados por aportes subterráneos no cuantificados en los mismos.

	BALANCE 1														BALANCE 2			BALANCE 3	BALANCE 4		
	Ca = 0.037				Ca = 0.25				Ca = 0.50				Ca = 0.90				Ca = 0.037				
	I = 0.05		I = 0.15		I = 0.05		I = 0.15		I = 0.05		I = 0.15		I = 0.05		I = 0.15		I = 0.05		I = 0.15		
	I = 0.05	I = 0.15	I = 0.05	I = 0.15	I = 0.05	I = 0.15	I = 0.05	I = 0.15	I = 0.05	I = 0.15	I = 0.05	I = 0.15	I = 0.05	I = 0.15	I = 0.05	I = 0.15	I = 0.05	I = 0.15			
89	46841	45785	44592	43536	42480	41952	40896	39840	37728	36672	35616	47232	46176	47389	47840						
AMARGA 90	45409	45189	44940	44720	44500	44390	44170	43950	43510	43290	43070	45490	45270	45519	45600						
89	29010	28491	27963	27495	27028	26794	26326	25859	24924	24456	23989	29503	28650	29677	30170						
AMARGA 90	97194	96589	85552	84947	84342	84040	83435	82830	81620	81015	80410	97418	96813	97496	97720						
89	79320	75578	71351	67609	63868	61997	58255	54514	47031	43289	39548	80704	78963	81191	82575						
CAMARON 90	154972	151979	148598	145605	142813	141253	140660	140198	139274	138812	138350	156079	153086	158468	157575						
89	25838	24226	22405	20793	19181	18375	16764	15152	11928	10317	8705	26434	24822	26644	27240						
GUALLAR 90	65272	64151	62885	61764	60643	60083	58962	57841	57358	57242	57127	65687	64566	65933	66248						
89	29175	28333	27382	26540	25698	25277	24435	23593	21909	21067	20225	29487	28645	29596	29908						
MUERTE 90	73985	73195	72303	71513	70723	70328	69538	68748	67168	66378	65588	74278	73488	74380	74673						
89	5967	3562	1121	300	244	216	159	103	0	0	0	6857	4452	7170	8060						
PEZ 90	17854	17500	17164	16867	16570	16422	16125	15828	15234	14937	14840	18067	17610	18142	18355						
89	25940	24428	22719	21207	19695	18939	17427	15915	12891	11379	9867	26499	24987	26896	27255						
PIÑOL 90	62802	61420	59858	58475	57093	56401	55019	54049	53057	52703	52350	61951	61931	63493	64005						
89	13269	7280	512	0	0	0	0	0	0	0	0	15485	9496	16403	19390						
PITO 90	144612	135511	125227	117001	112579	110880	107482	104083	97287	93889	90490	147980	138879	149302	153440						
89	857852	651477	526832	498352	469872	455632	427152	398672	341712	313232	284752	939189	719359	967767	1056176						
PLAYA 90	830645	747567	707530	701656	695782	692845	686971	681097	669349	663475	657601	861665	777827	872564	903584						
89	22354	17052	11060	6178	3290	1848	0	0	0	0	0	24351	19014	25150	27423						
PUEYO 90	73072	69403	65256	61600	58371	57249	55878	54508	51768	50397	49027	74465	70760	75051	76720						
89	11798	3707	0	0	0	0	0	0	0	0	0	14792	6701	15844	18838						
REBOLLON 90	46997	45974	44819	43798	42773	42261	41238	40215	38169	37146	36123	49212	46353	50073	52525						
89	40214	34472	27984	22242	16500	13629	7887	2145	9339	15081	20823	42339	36597	43085	45210						
ROLLICO 90	121969	117266	112752	112026	111300	110937	110211	109485	108033	107307	106581	123709	119006	124320	126060						
89	188	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	488	0	593	893						
SALADAR 90	70260	65444	62100	60804	59568	58950	57714	56478	54006	52770	51534	72042	67226	72668	74450						
89	74451	73233	71858	70640	69501	68977	67928	66879	64782	63733	62684	74901	73684	75060	75510						
SALINETA 90	62942	61938	60804	59801	58798	58296	57293	56289	54282	53908	53539	63313	62309	63443	63815						

Para la laguna de La Playa, el valor medio de los supuestos contemplados en el Balance 1, que es el más consistente desde un punto de vista conceptual, arroja unos aportes subterráneos de 475 Dm³ (C.V. = 35%) en 1989 y 703 Dm³ (C.V. = 7%) en 1990, y un valor promedio para los dos años estudiados de 589 Dm³/año. A estos valores habría que sumar el volumen de agua embalsado, de difícil cuantificación, que podría oscilar en torno a valores de 25 a 238 Dm³, lo que daría un valor final promedio anual de 614 (valor mínimo) a 827 Dm³/año (valor máximo). Los valores deducidos por IRYDA (1989) son de 1.700 Dm³, esto es, más del doble de los cuantificados por el Balance 1.

En la Tabla 72 se presentan, para cada laguna y para el total acumulado de las mismas, los déficit máximos y mínimos estimados en la Tabla 71, los volúmenes máximos y mínimos de agua embalsada y la suma de ambos componentes, que arroja la estima final de aportes subterráneos. Tal como se ha reiterado suficientemente, estos valores sólo pueden ser aproximaciones a la realidad, pero son ilustrativos de los órdenes de magnitud de los flujos subterráneos que abastecen a las lagunas analizadas. Las mayores aportaciones se producen en la laguna de La Playa y las menores en la laguna del Pez. Para el conjunto de lagunas las aportaciones subterráneas acumuladas oscilan entre un máximo de 2.606 y un mínimo de 625 Dm³/año, de las que prácticamente la mitad corresponden a La Playa.

En definitiva, estos resultados sugieren que las entradas por descarga subterránea en las lagunas son del mismo orden de magnitud (entre 1.9 veces superior y 2.2 veces inferior para los valores máximo y mínimo de descarga subterránea, respectivamente) a las entradas por lluvia directa sobre las superficies de máxima inundación (1.345 Dm³/año para el período estudiado), lo que refuerza el importante papel que juegan los acuíferos de esta zonas endorreicas en la explicación del funcionamiento hidrológico de las lagunas.

Hidroquímica

La composición química de las aguas lagunares depende de la composición de las aguas de entrada, de los procesos de mezcla de las distintas fuentes, de su interacción con el sedimento lagunar y de los procesos de evapoconcentración y geoquímicos derivados.

Composición química de las aguas de entrada a las lagunas.

En el apartado anterior se han considerado como posibles aportaciones de agua a las lagunas las procedentes de la lluvia directa, las correspondientes escorrentías superficial y subsuperficial y las aguas subterráneas. Geoquímicamente, pueden considerarse dos tipos de agua de entrada: aguas poco mineralizadas (aguas de lluvia y de escorrentía superficial) y aguas mineralizadas (aguas subsuperficiales y subterráneas).

La composición química media medida en las aguas de lluvia y en las aguas de los pozos más próximos a las lagunas (que pueden considerarse en una primera aproximación las aguas más representativas de entrada subterránea a las lagunas) se presenta en la Tabla 73. Los elevados coeficientes de variación son lógicamente debidos a la variabilidad espacial (diferentes pluviómetros y pozos) y temporal (diferentes fechas de muestreo).

Tabla 72. Déficit máximos y mínimos (m³/año) estimados en los balances hídricos, volumen de agua embalsada y volumen total (m³/año) que debe ser compensado por componentes no cuantificadas en quince lagunas de Monegros durante 1989-1990.

LAGUNAS	Máximo	Mínimo	Agua embalsada		Total Máximo	Total Mínimo
			Máximo	Mínimo		
AMARGA I	47840	35616	4375	469	52215	36085
AMARGA II	97720	23989	7292	2552	105012	26541
CAMARON	157575	35548	28125	14112	185700	49660
GUALLAR	66248	10317	13125	4687	79373	15004
MUERTE	74673	21067	9297	6562	83970	27629
PEZ	18355	0	4063	3594	22418	4063
PIÑOL	64005	9867	11250	6094	75255	15961
PITO	153440	0	43750	16406	197190	16406
PLAYA	1056176	284752	238000	25500	1294176	310252
PUEYO	76720	0	35000	14200	111720	14200
REBOLLON	52525	0	14062	7031	66587	7031
ROLLICO	126060	20823	33750	8438	159810	29261
SALADAR	74450	0	5833	5104	80283	5104
SALINETA	75510	53539	16375	14625	91885	68164
TOTAL	2141243	495518	464297	129374	2605594	625361

Tabla 73. Hidrogeoquímica de las áreas endorreicas: CE, composición química media y coeficiente de variación (CV) de las aguas de entrada a las lagunas: Asub = aguas subterráneas (1 = Cuenca endorreica central (n=63); 2 = aguas en el entorno de las lagunas Amargas I y II (n=8)). Allu = aguas de lluvia (n=57).

		CE	Ca	Mg	Na	HCO ₃	SO ₄	Cl
		(dS/m)	(meq/L)					
Asub	X ₁	7.3	27	50	40	3.9	92	43
	X ₂	6.2	32	45	37	2.2	88	41
	CV ₁	156	86	165	178	54	183	92
	CV ₂	64	82	148	161	37	122	90
Allu	X	0.3	1.9	0.4	1.3	0.8	1.3	1.2
	CV	39	70	66	97	88	90	64

Desde el punto de vista de las aguas de lluvia, es interesante resaltar que sus valores medios de CE son elevados en relación con otras referencias que se detallan más adelante, y que los iones predominantes son el Ca, asociado al SO₄ y en menor medida al HCO₃, y el Na, asociado en su práctica totalidad al Cl. Estos resultados indican que los sólidos disueltos en el agua de lluvia pueden provenir de la movilización eólica de minerales tipo calcita, dolomita, anhidrita, yeso y halita, muy frecuentes en los fondos de las lagunas próximas a los pluviómetros (Garces et al., 1991). Esta proximidad a los sedimentos salinos presentes en las lagunas, asociada al régimen de vientos típico de Monegros II, explica asimismo los valores elevados de CE, que no son necesariamente típicos de otras áreas más alejadas de estas cubetas endorreicas.

En el Anexo 12 se presenta, para cada laguna y fecha de muestreo, la CE y composición iónica de las aguas de lluvia recogidas en los pluviómetros. La Figura 76, que resume los valores recopilados en dicho anejo, indica que la CE y composición iónica de la precipitación atmosférica es altamente variable, tanto desde el punto de vista espacial (valores medios de las lagunas entre 0.54 y 0.17 dS/m) como temporal (coeficientes de variación de la media de CE de hasta el 100% en alguna laguna). La variabilidad espacial viene muy afectada por la ubicación del pluviómetro; así, el valor máximo se obtiene en La Playa, que es la laguna más extensa, y el mínimo en Valcuerna, esto es, área alejada de las cubetas salinas. La variabilidad temporal es debida a la mezcla de corrientes de aire dentro de un régimen típicamente tormentoso (Kennedy et al., 1979), las características de las condiciones previas al episodio tormentoso y, en particular, a la presencia de aerosoles y partículas de polvo minerales que constituyen el "dry fallout" (Whitehead y Feth, 1964), en los que la existencia de vientos dominantes y fuertes (superiores incluso a 200 Km/día, capítulo 2) tienen especial relevancia.

La composición media de las precipitaciones presenta valores superiores a los presentados por Gambell y Fisher (1966) para diversas áreas del mundo, y por Carroll (1962) y Cleaves et al. (1976) para diversas áreas de Europa. Sin embargo, excepto para el calcio, estos valores son inferiores a los presentados para zonas áridas por Carroll (1962) para Australia, y Whitehead y Feth (1964), para California y Méjico. En cuanto a la presencia de elementos menores, no se ha detectado la presencia de nitritos y potasio en cantidades superiores a 0.01 meq/L, en tanto que los nitratos presentan valores similares a los de Whitehead y Feth (1964) para climas semiáridos. Elementos

traza como el estroncio y el litio, que por lo común no aparecen en las aguas de lluvia, tampoco forman parte de la composición química en nuestro caso. En la Cuenca del Ebro, Faci et al. (1983) presentan datos medios del agua de lluvia en 11 estaciones meteorológicas. Los valores de CE e iones de las aguas de lluvia en Monegros se aproximan a los de las estaciones de Aula Dei y Crida-07, próximas a Zaragoza, pero son claramente superiores a los del resto de las estaciones de la Cuenca.

En definitiva, del análisis de las aguas de lluvia puede concluirse que sus valores de CE son más elevados de lo anticipado por otras referencias, de tal manera que los mismos son similares a los de las aguas del canal de Monegros, lo que significa que la masa de sales por unidad de volumen aportada por la lluvia en dichas zonas endorreicas es del mismo orden de magnitud que la aportada por las futuras aguas de riego.

La composición química media de las aguas subterráneas presentada en la Tabla 73 es sólo orientativa, ya que la complejidad del sistema hidrogeológico no permite considerarlas como representativas de todas las aguas presentes en el área de estudio. A pesar de ello, puede observarse que estas aguas son bastante salinas (valores de CE en torno a 6-7 dS/m) y con el SO_4Mg como la sal predominante. Estas aguas se clasifican, según Eugster y Hardie (1978), como de tipo II, esto es, contenidos de Ca + Mg muy superiores a la alcalinidad total (tres veces mayores en las aguas de lluvia y de veinte a treinta y cinco veces mayores en las aguas subterráneas). El estadio final de la evolución teórica de estas aguas sometidas a evaporación conduce a salmueras del tipo Na-Ca-Mg-Cl para las aguas de lluvia (donde $m\text{Ca} > m\text{SO}_4$) y Na-Mg-Cl- SO_4 para las aguas subterráneas (donde $m\text{Ca} < m\text{SO}_4$).

Composición química del agua libre de las lagunas

En la Tabla 74 figuran los datos medios de CE y composición iónica de las aguas de las quince lagunas consideradas en el estudio, así como los valores promedio para el conjunto de las mismas. Las salinidades de estas aguas lagunares son extremadamente elevadas (CE media = 69 dS/m) y, en particular, las de las lagunas de Salineta y la Muerte (> 100 dS/m). Los mínimos de CE (< 31 dS/m) corresponden a las lagunas que se encuentran fuera de la cuenca endorreica central y en la parte más oriental del Miembro Bujaraloz (Amarga I y II).

Los contenidos iónicos medios de las aguas lagunares son claramente superiores a los de las aguas fuente potenciales (Tabla 73), aunque los iones preponderantes coinciden con los previstos por el diagrama de Eugster y Hardie (1978) para la evaporación de las aguas subterráneas (aguas tipo Na-Mg-Cl- SO_4). Este hecho sugiere que el proceso de evapo-concentración de dichas aguas es el determinante de la evolución geoquímica de las aguas lagunares. Coincidiendo con los resultados de Pueyo (1978), las lagunas de Rebollón y Pez presentan los contenidos más elevados de Ca (> 70 meq/L). El anión bicarbonato está presente en las aguas con contenidos menores de 12 meq/l. El carbonato es muy pequeño y se presenta en determinadas lagunas (Salineta, Pueyo, Guallar, Muerte, Piñol, Camarón y Amarga II) de manera esporádica. Por el contrario, los cloruros y sulfatos son, por este orden, los mayoritarios en estas aguas. Existen, además, pequeñas cantidades de nitratos, litio, potasio y estroncio que fueron estimadas cualitativamente. Pueyo (1979) encontró asimismo pequeñas cantidades de litio, rubidio, manganeso y potasio.

Garcés et al. (1991) atribuyen la composición de las aguas de Monegros a la lixiviación de carbonatos y sulfatos del material soluble predominante en la región (calizas y yesos alabastrinos) por las aguas de escorrentía. Las elevadas concentraciones de Cl

y Na las atribuyen a posibles aportes de escasa entidad en las aguas de escorrentía mantenidos un gran período de tiempo, ya que dichos iones no tienen representación en la litología de la zona.

Por el contrario, el estudio de IRYDA (1989) justifica la presencia de estos iones por la existencia potencial de impurezas de NaCl en yesos y margas. Dichas impurezas no se han detectado en nuestro análisis de los yesos presentado en el capítulo 4 ("salinidad de los materiales litológicos") y sólo muy ligeramente en una de las margas analizadas. En las lutitas analizadas se encontraron, sin embargo, cantidades pequeñas pero significativas de Na, especialmente cuando se equilibraron las mismas con agua saturada en yeso, lo que justificaría la presencia de este ion en las aguas lagunares a través de procesos de intercambio catiónico con el Ca proveniente de la disolución de sus minerales (yeso preferentemente), flujos subterráneos lentos y continuados hacia las lagunas, y evapoconcentración en los fondos de estas cubetas endorreicas. No puede, sin embargo, descartarse la posibilidad apuntada en el estudio de IRYDA de que dichas impurezas potenciales de halita se encuentren presentes en otros yesos y margas no analizados en este trabajo. Debe asimismo mencionarse que la presencia de Na y Cl en las aguas de precipitación es significativa (Tabla 73), por lo que podría ser una fuente potencial de estos iones.

La clasificación de las aguas lagunares se ha realizado según el criterio de Eugster y Hardie (1978): cuando el contenido de un elemento es inferior al 5% no interviene en la clasificación, entre el 5 y 25% aparece entre paréntesis y por encima del 25% aparece por orden del ion mayoritario. Consecuentemente, y como resultado de los datos presentados en la Tabla 74, los tipos de salmueras presentes corresponden a Cl-Na-(Mg)-(SO₄) y Na-Cl-(SO₄)-(Mg), esto es, aguas dominantes en todos los casos en los cationes Na y Mg y los aniones Cl y SO₄.

La elevada variabilidad estacional de las aguas lagunares queda reflejada por los valores que se presentan en el Anexo 12 (evolución geoquímica de las aguas lagunares entre 1987 y 1990) y por las elevadas desviaciones estándar de las medias reflejadas en la Figura 73. Esta variabilidad es coherente con el proceso de llenado (dilución) y vaciado (evapoconcentración) de las lagunas que se ha presentado en un apartado anterior.

A efectos de síntesis, la Tabla 75 presenta la CE y composición iónica media del conjunto de lagunas en siete fechas de muestreo. La composición iónica de las aguas lagunares es diferente según la estación del año y, dentro de una misma estación, coexisten tipos de salmueras distintas (Anexo 12). En invierno se presentan salmueras del tipo Ca-Na-Cl (Tipo IIa: en Salineta, Amarga II, Saladar y Rebollon), tipo Mg-Na-Cl (Salobral) y tipo Na-SO₄-Cl (resto). Se pone de manifiesto la influencia de las lluvias en la composición y evolución geoquímica de las salmueras en esta época del año ya que, excepto para Salobral, coinciden con la evolución teórica esperada para las aguas de entrada (en esta época la componente mayoritaria en el agua embalsada son las aguas de precipitación). En el resto de estaciones, los tipos de salmuera predominantes son Cl-Na-(SO₄) (Primavera), Cl-Na-(SO₄)-(Mg) y Na-Cl-Mg (Verano), y Na-Cl, Na-Cl-SO₄, Mg-Na-Cl y Na-Cl-Mg (Otoño).

La evolución de las salmueras está estrechamente ligada a la de la conductividad eléctrica. En la Tabla 75 puede observarse que sólo en los meses de Diciembre los valores de CE son inferiores a la media (70 dS/m, Tabla 74) debido a que durante el otoño se dan las mayores precipitaciones anuales y a que la evaporación diaria en invierno es muy baja. Los valores de CE, y por lo tanto de los iones, aumentan en primavera, obteniéndose el valor máximo medio en el muestreo de Junio de 1988 (113 dS/m de CE).

Tabla 74. Conductividad eléctrica (CE, dS/m a 25 °C) y composición iónica media de quince aguas lagunares de Monegros II (período 1987-1990).

LAGUNA	CE (dS/m)	Ca (meq/L)	Mg (meq/L)	Na (meq/L)	HCO3 (meq/L)	SO4 (meq/L)	Cl (meq/L)
AMARGA I	30.7	48	160	195	1.1	156	278
AMARGA II	26.2	58	113	177	0.8	120	264
CAMARON	92.8	40	765	1537	4.8	615	1606
GUALLAR	90.1	32	953	1502	9.5	791	1949
MUERTE	112.0	29	1113	1985	11.1	786	2355
PEZ	56.3	74	148	622	1.4	152	753
PIÑOL	81.7	41	380	1178	4.0	314	1256
PITO	73.5	60	245	570	1.2	202	1355
PLAYA	91.9	48	369	1005	3.1	372	1225
PUEYO	74.6	42	250	1162	3.6	422	1306
REBOLLON	46.0	71	94	412	1.1	128	497
ROLLICO	65.6	60	207	788	1.7	205	940
SALADAR	44.1	44	154	543	2.9	238	552
SALINETA	109.7	16	1197	1935	7.5	1384	2017
SALOBRAL	49.4	25	360	705	7.8	394	547
MEDIA	69.3	46	434	954	4.1	419	1127
CV (%)	37	35	84	59	79	80	56

Tabla 75. Conductividad eléctrica (CE) y composición iónica media del conjunto de lagunas en siete fechas de muestreo.

		Abril 1987	Dicbre. 1987	Marzo 1988	Junio 1988	Dicbre. 1988	Marzo 1989	Marzo 1990
CE	(dS/m)	88	43	74	113	57	107	87
Ca	meq/L	43	43	57	27	41	47	53
Mg		354	132	340	1098	301	593	430
Na		376	443	857	2480	706	1634	976
HCO ₃		2.7	1.9	3.6	12.3	2.4	4.3	30.6
SO ₄		507	206	393	1111	288	358	394
Cl		1322	479	1022	2608	744	1580	1043

La explicación de esta variabilidad temporal puede asimismo deberse a otras causas entre las que cabe citar: (1) precipitaciones esporádicas e intensas, (2) procesos de fraccionamiento y separación del sistema de determinados minerales en función de la temperatura y actividad iónica de las soluciones, (3) acción del viento que contribuye a la evacuación selectiva de sales, (4) procesos de disolución parcial de las costras eflorescentes, (5) variabilidad en la calidad y cantidad de los aportes subterráneos (apuntada en 5.4.1.) y (6) procesos derivados de la mezcla de las aguas fuente.

Dada la elevada salinidad de estas aguas lagunares, es evidente que la CE y la concentración iónica no representan los valores de salinidad efectiva, debido a las interacciones entre los iones y entre éstos y el agua. Por ello, es interesante calcular la fuerza iónica y actividades iónicas de estas aguas, que se han efectuado con el modelo WATEQ4F. Aunque dicho modelo no se desarrolló para salinidades tan elevadas, ya que utiliza la ecuación de Debye-Huckel para el cálculo de los coeficientes de actividad, sus resultados son bastante razonables en comparación con otros modelos basados en las ecuaciones de Pitzer. Así, Garcés et al. (1991) dedujeron valores comparables utilizando ambas aproximaciones para aguas con fuerzas iónicas similares a las de nuestro trabajo. La Tabla 76 presenta los resultados obtenidos con WATEQ4F, de la que se deduce que la concentración efectiva de estos iones es muy inferior a la concentración analítica, aspecto de gran relevancia a la hora de calcular los índices de saturación mineralógicos. Asimismo, se deduce que las relaciones iónicas basadas en las actividades son muy diferentes a las basadas en concentraciones. Por ejemplo, la relación Na/Ca, que era de 21 (concentraciones en Tabla 74), es igual a 81 en base a las actividades en meq/kg, debido a la interacción importante del Ca con otros iones. Algo parecido puede decirse de la relación Na/Mg, que pasa de 2 (en base a concentraciones) a 5.4 (en base a actividades), o de la relación Cl/SO₄ que pasa de 2.7 a 33, debido a que el Cl no forma pares iónicos.

Las relaciones entre la CE y las distintas concentraciones iónicas son interesantes para profundizar en el conocimiento de la hidroquímica del sistema. La Figura 78 presenta dichas relaciones para los valores medios de las quince aguas lagunares presentados anteriormente en la Tabla 74. Tal como era previsible, el Na y el Cl están linealmente correlacionados con la CE (R^2 respectivos de 0.92 y 0.88, significativos al 0.1%), ya que su interacción con el resto de los iones es débil (Na) o inexistente (Cl). Estas elevadas correlaciones sugieren que las aguas lagunares provienen mayoritariamente de aguas subterráneas del entorno próximo a cada laguna. Existen además diferencias entre lagunas debidas a distintas evapoconcentraciones de sus aguas, y a que la acumulación de estos iones se produce sin un control apreciable de las fases sólidas relacionadas con estos iones (fundamentalmente halita -NaCl- y thenardita -Na₂SO₄-), esto es, que dichas aguas no han llegado al nivel de saturación con estos minerales.

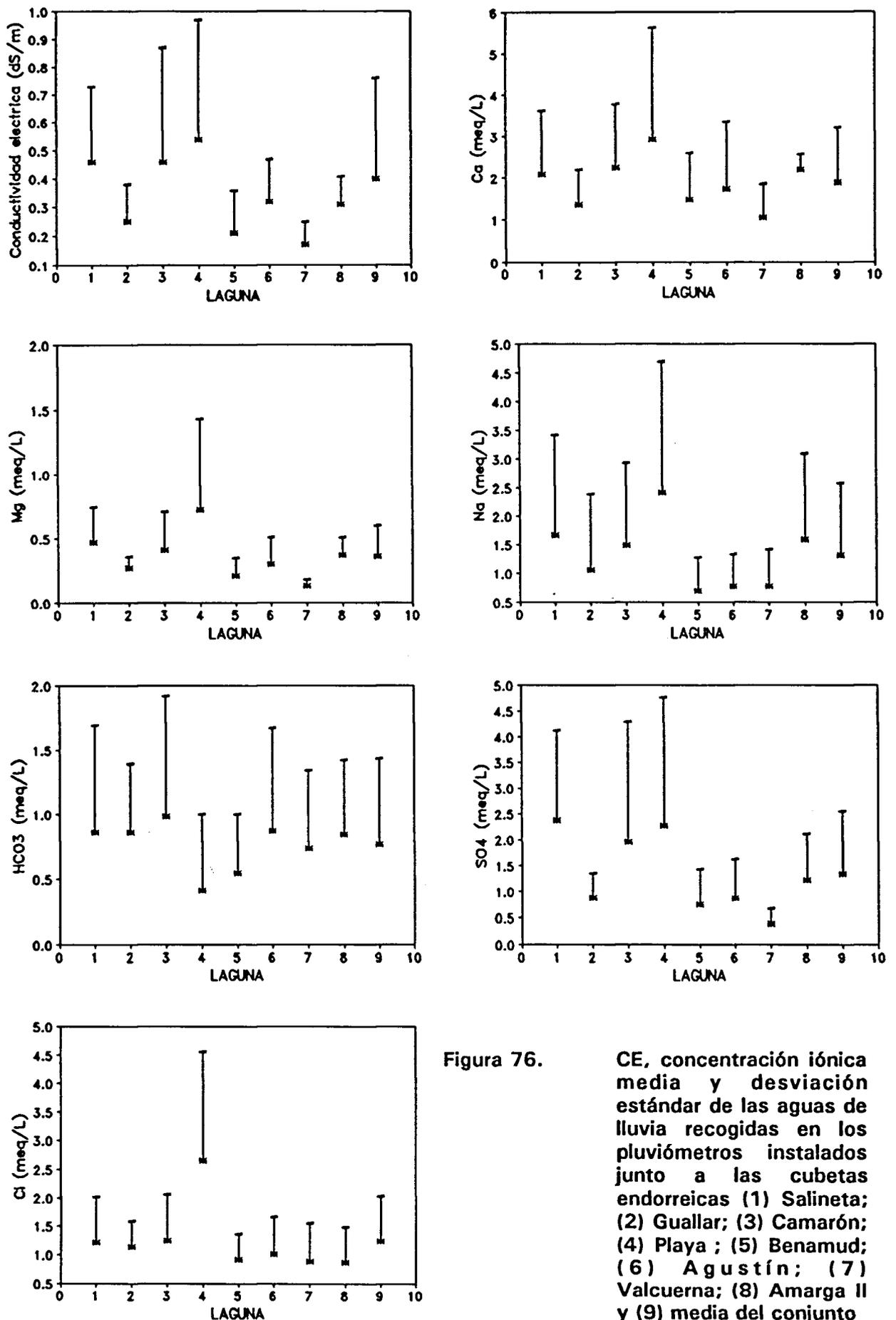


Figura 76. CE, concentración iónica media y desviación estándar de las aguas de lluvia recogidas en los pluviómetros instalados junto a las cubetas endorreicas (1) Salineta; (2) Guallar; (3) Camarón; (4) Playa; (5) Benamud; (6) Agustín; (7) Valcuerna; (8) Amarga II y (9) media del conjunto

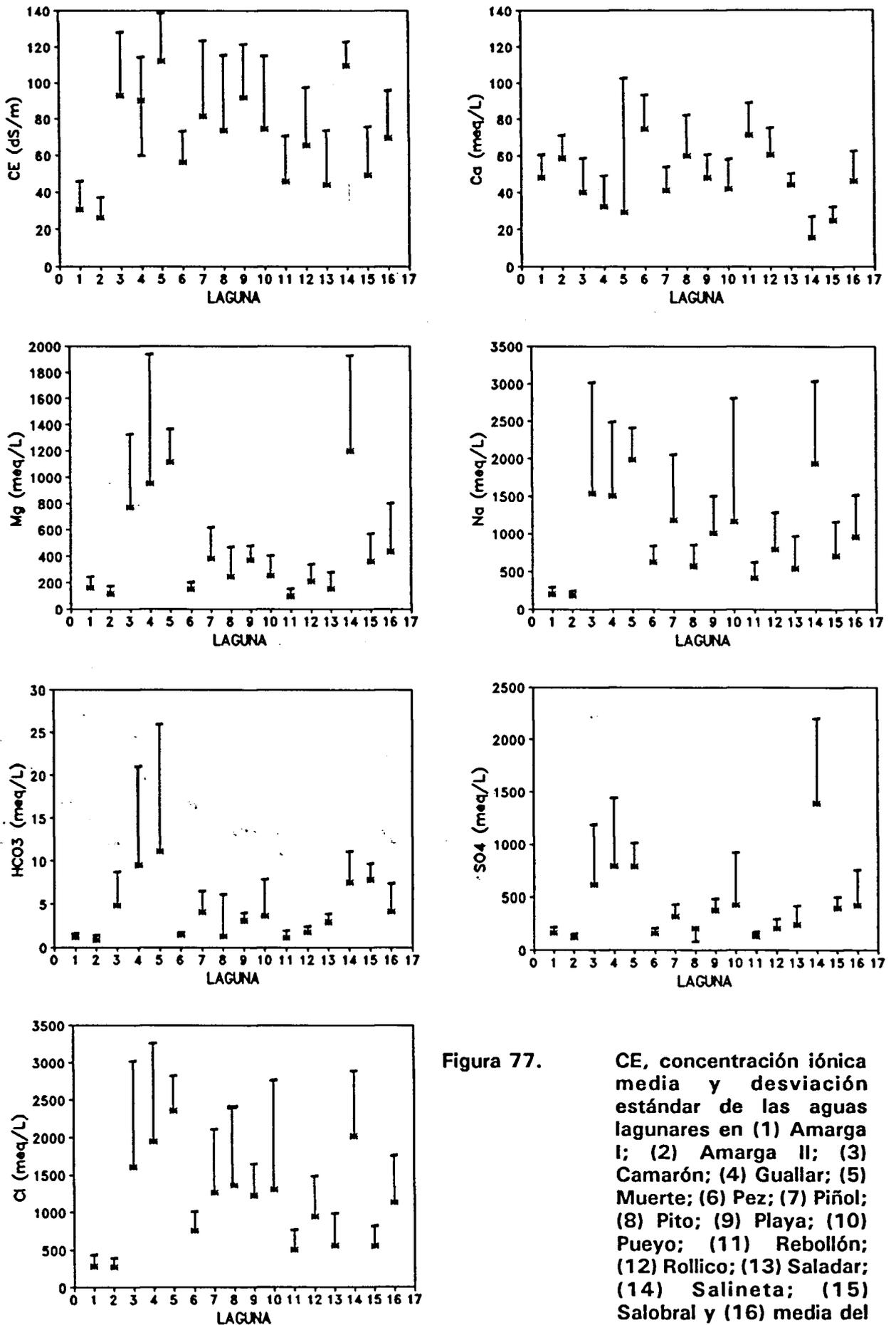


Figura 77.

CE, concentración iónica media y desviación estándar de las aguas lagunares en (1) Amarga I; (2) Amarga II; (3) Camarón; (4) Guallar; (5) Muerte; (6) Pez; (7) Piñol; (8) Pito; (9) Playa; (10) Pueyo; (11) Rebollón; (12) Rollico; (13) Saladar; (14) Salineta; (15) Salobral y (16) media del conjunto.

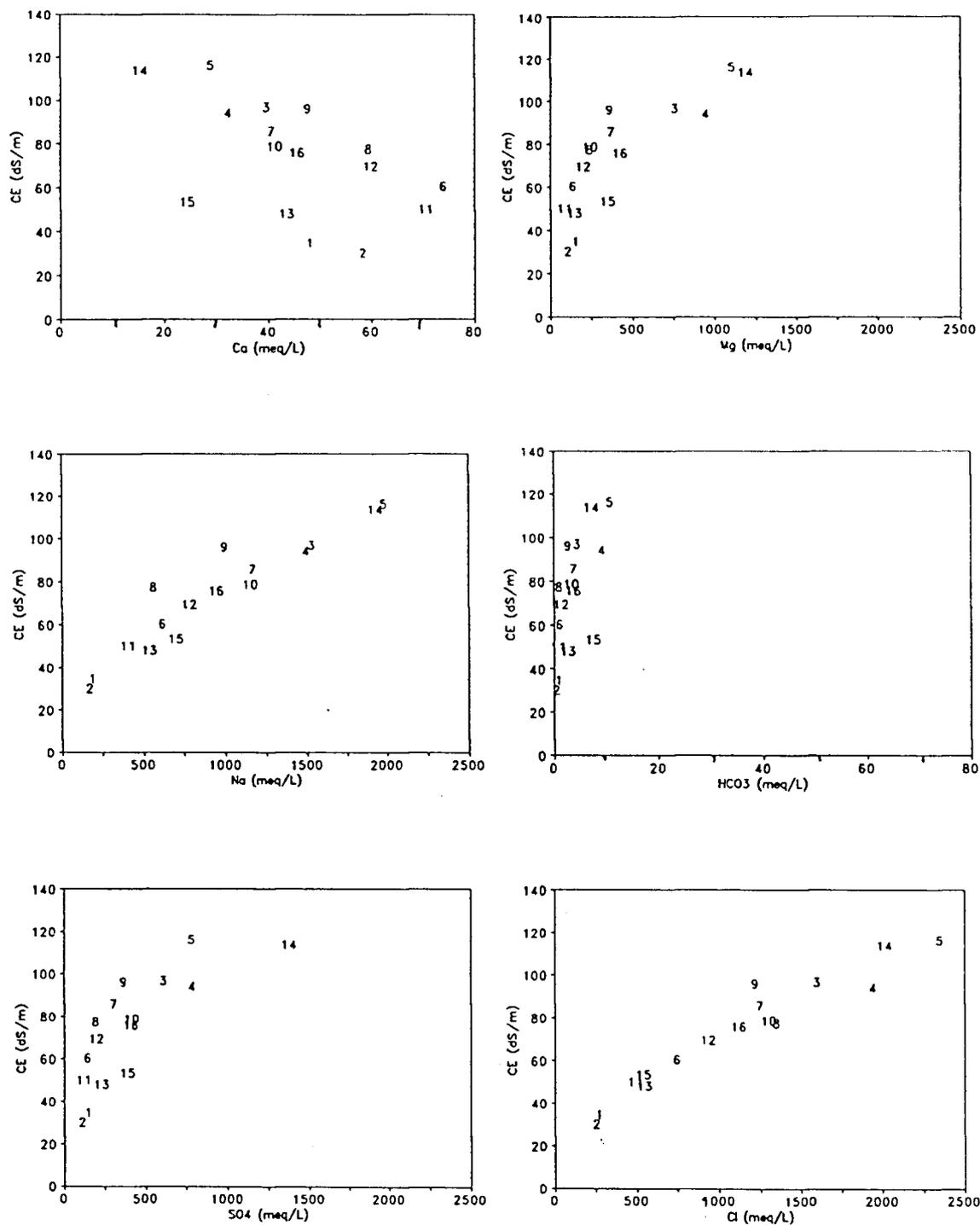


Figura 78. Relación entre la composición iónica media y la CE media de las aguas de quince lagunas de Monegros: (1) Amarga I; (2) Amarga II; (3) Camarón; (4) Guallar; (5) Muerte; (6) Pez; (7) Piñol; (8) Pito; (9) Playa; (10) Pueyo; (11) Rebollón; (12) Rollico; (13) Saladar; (14) Salineta y (15) Salobral.

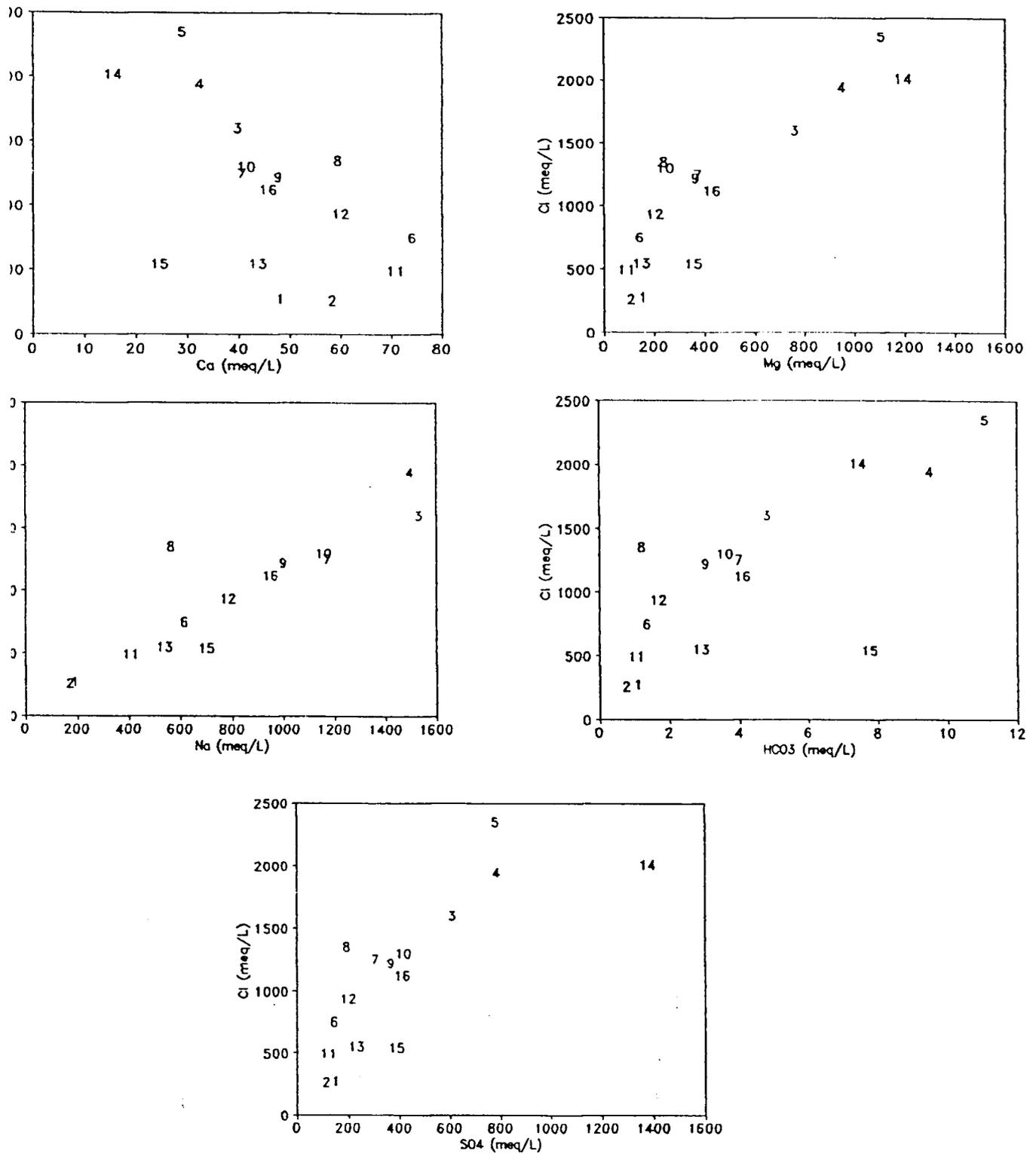


Figura 79. Relación simple entre el ion cloruro y la composición iónica de las aguas de quince lagunas de Monegros: (1) Amarga I; (2) Amarga II; (3) Camarón; (4) Guallar; (5) Muerte; (6) Pez; (7) Piñol; (8) Pito; (9) Playa; (10) Pueyo; (11) Rebollón; (12) Rollico; (13) Saladar; (14) Salineta y (15) Salobral.

Tabla 76. Valores de fuerza iónica y actividades de los iones fundamentales calculados por WATEQ4F a partir de la composición iónica media de las aguas lagunares en el período 1987-1990.

LAGUNA	I (mmol/Kg)	Ca (mmol/Kg)	Mg (mmol/Kg)	Na (mmol/Kg)	HCO ₃ (mmol/Kg)	SO ₄ (mmol/Kg)	Cl (mmol/Kg)
AMARGA I	0.459	4.6	17.2	137	0.50	8.7	164
AMARGA II	0.421	5.9	12.8	125	0.37	7.2	177
CAMARON	2.648	5.4	137.5	1462	0.94	11.8	1043
GUALLAR	3.034	4.7	185.8	1540	1.71	13.9	1296
MUERTE	3.786	5.8	313.7	2376	1.67	11.1	1621
PEZ	0.990	7.8	18.4	4.6	0.52	6.1	477
PIÑOL	1.824	4.8	56.2	971	1.21	8.4	792
PITO	0.996	5.9	2.9	4.2	0.47	7.5	425
PLAYA	1.717	5.1	49.4	808	1.12	10.7	773
PUEYO	1.796	4.3	32.1	943	1.56	13.2	829
REBOLLON	0.675	7.2	10.9	293	0.56	6.4	322
ROLLICO	1.254	6.4	26.7	604	0.72	7.2	592
SALADAR	0.846	3.9	16.0	385	1.42	10.8	353
SALINETA	3.696	2.3	237.0	2253	2.20	23.2	1415
SALOBRAL	1.112	2.1	36.6	509	3.18	13.7	346
MEDIA	1.683	5.1	76.9	828	1.21	10.7	708
CV	66	31	125	93	64	41	65

La relación de la CE con el Mg y el SO_4 es menos lineal que en los casos anteriores (aunque los R^2 respectivos de 0.69 y 0.60 son también significativos al 0.1%), debido a la formación de pares iónicos. Puede observarse además que la relación es cóncava con respecto al eje de abscisas, lo cual es una indicación de que estos iones están controlados en mayor o menor medida por una fase sólida. Por otro lado, el Ca disminuye con la CE debido a su fuerte control por una fase sólida asociada a carbonatos y/o sulfatos y al efecto del ion común. Finalmente, tal como era de esperar, el HCO_3 es independiente de la CE, ya que en sistemas saturados en minerales carbonatados y sulfatados, donde el Ca es mayor que el HCO_3 , la precipitación de los minerales carbonatados fija los niveles máximos de pH y por lo tanto los niveles de bicarbonato.

Las relaciones entre el Cl y el resto de iones son asimismo interesantes desde el punto de vista geoquímico (Eugster y Hardie, 1978) y se presentan en la Figura 79 con los valores presentados en la Tabla 74. Estas relaciones son conceptualmente similares a las deducidas de las relaciones CE-iones. El Ca y el HCO_3 se comportan claramente como no conservativos, en tanto que el coeficiente de determinación obtenido con el Na es de 0.88, indicando que ambos iones permanecen en solución a elevadas concentraciones y que este comportamiento es común en el área de estudio. La laguna del Pito (Nº 8) es la que más se aleja de la tendencia general Cl-Na, lo que puede atribuirse a un error analítico (probablemente en el ion Cl) o a que la composición de esta laguna difiere de las del resto. Las lagunas Amarga I y II son las que más se alejan de la tendencia general, hecho lógico si se tiene en cuenta que son geográficamente las más alejadas del sistema endorreico en consideración y que por tanto sus aguas fuente subterráneas son diferentes (contenidos en cloruro inferiores).

Los índices de saturación calculados por WATEQ4F a partir de los valores de la Tabla 92 se presentan en la Figura 80. Los resultados obtenidos son conceptualmente coherentes con los deducidos cualitativamente de las relaciones CE-iones (Fig. 78) de tal manera que todas las lagunas están saturadas o sobresaturadas en anhidrita (CaSO_4), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), calcita (CaCO_3 en su forma beta), huntita ($\text{Mg}_3\text{Ca}(\text{CO}_3)_4$) y, en particular, en dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Esta elevada sobresaturación de la dolomita fue asimismo observada por Garcés et al. (1991) en aguas de la Laguna de la Playa, lo que indicaría que esta sal mixta es la de formación preponderante en el sistema endorreico de Monegros II. Las mayores sobresaturaciones se producen en dolomita (con dos excepciones), magnesita (con seis excepciones) y huntita (una excepción). Estos aspectos coinciden con lo apuntado por Pueyo (1991). Por el contrario, estas aguas lagunares están sistemáticamente subsaturadas en los minerales thenardita (Na_2SO_4) y halita (NaCl), lo que confirma el hecho ya apuntado de que los iones Na y Cl no están controlados por fases sólidas. Finalmente, la ausencia de thenardita y minerales de carbonato sódico (nahcolita, trona, etc.) es coherente con el hecho de que las relaciones iónicas Na/Cl y $\text{Na}/(\text{Cl} + \text{SO}_4)$ sean, respectivamente, menores que la unidad (Tabla 74).

Un último aspecto analizado es el de la relación entre los parámetros CE, I y TDS. Dichas relaciones son útiles para la estimación de unos parámetros a partir de otros en estas aguas de elevada salinidad, en las que las relaciones establecidas para aguas menos salinas no son aplicables. La Tabla 77 presenta las ecuaciones de regresión de mejor ajuste entre estos parámetros.

Tabla 77. Ecuaciones de regresión entre conductividad eléctrica (CE, dS/m), fuerza iónica (I) y sólidos disueltos (TDS, mg/L) de las aguas libres de quince lagunas de Monegros II.

ECUACION DE REGRESION	R ²	n
$\text{Ln TDS} = 6.15 + 1.19 \text{ Ln CE}$	0.87 ***	14
$\text{Ln I} = -5.89 + 1.49 \text{ Ln CE}$	0.90 ***	14
$\text{Ln TDS} = 10.85 + 0.77 \text{ Ln I}$	0.91 ***	14

La relación CE-TDS refleja el efecto de formación de pares iónicos neutros en soluciones de CE muy elevada, lo que impide que la CE medida se relacione linealmente con el contenido en sólidos disueltos. De cualquier forma, estas regresiones son significativas al 0.1%, lo que permite estimar las variables dependientes a partir de las independientes con un alto grado de fiabilidad.

Análisis del sedimento lagunar

El sedimento lagunar posee un espesor variable tanto en las distintas lagunas como dentro de las mismas, y su prospección se ve dificultada por la presencia generalizada de agua a profundidades someras (entre 30 y 70 cm). Aunque distintos sondeos efectuados con barrena helicoidal indican que los espesores de estos sedimentos alcanzan los 1.5-2.5 m, la profundidad máxima alcanzada en este trabajo ha sido, por razones operativas, de 60 cm.

El sedimento salino lagunar ocupa la totalidad del área de inundación de las lagunas y en verano se encuentra generalmente bajo costras salinas eflorescentes y tapices secos de algas. En las lagunas estudiadas pueden apreciarse visualmente dos tipos diferentes de sedimentos: (a) un sedimento de aspecto arenoso, homogéneo en profundidad y formado mayoritariamente por cristales de diferentes minerales evaporíticos y (b) un sedimento de aspecto variable en profundidad que en la parte superior (nunca más allá de los 30 cm de profundidad) es arcilloso, de color negro, con intensa actividad bacteriana y gran cantidad de materia orgánica, y bajo el cual existe un sedimento con las mismas características que el de tipo (a).

En el Anexo 9 se presentan los valores de CE obtenidos en cinco muestreos para el agua libre, el agua intersticial del sedimento a diferentes profundidades y los extractos de pasta saturada de quince lagunas de Monegros II. En la Tabla 78 se presenta la CE de las aguas libres y del agua intersticial del sedimento a 30 y 60 cm.

Tabla 78. Conductividad eléctrica media (CE, dS/m) del agua libre (AL), y de las aguas extraídas por las sondas de succión instaladas a 30 cm (SS₃₀) y 60 cm (SS₆₀) en catorce lagunas de Monegros.

LAGUNA	AL	SS ₃₀	SS ₆₀
AMARGA I	16	60	95
AMARGA II	18	86	88
CAMARON	97	126	114
GUALLAR	102	132	131
MUERTE	97	125	114
PEZ	35	39	48
PIÑOL	78	120	115
PITO	42	52	48
PLAYA	58	85	80
PUEYO	35	62	62
REBOLLON	21	70	73
ROLLICO	38	124	127
SALADAR	24	93	94
SALINETA	107	128	130

De esta Tabla y de los datos del Anexo 9 pueden deducirse varias conclusiones:

(1) En general, la CE del agua libre es inferior a la CE del agua extraída del sedimento superficial (0-10 cm), lo que indica su menor saturación en sales debido probablemente al efecto diluidor del agua de lluvia. En cuatro lagunas las CE de ambas aguas coinciden, lo que sugiere que en el resto no existe un equilibrio termodinámico de los minerales entre ambas fases (Anexo 9, muestreo de Enero 1989).

(2) La CE aumenta generalmente con la profundidad, tal como se deduce de la comparación de los valores del extracto del sedimento superficial con los extractos de las sondas de succión instaladas a 30 y 60 cm de profundidad. Estos perfiles de salinidad son opuestos a los perfiles invertidos típicos de suelos con capas freáticas salinas superficiales, en los que la salinidad disminuye con la profundidad. Ello sugiere que el efecto de los sedimentos salinos, permanentes en estas lagunas, asociado a tiempos de residencia largos que permiten el equilibrio de estas aguas intersticiales con los mismos, es más relevante que el efecto de evapoconcentración que se produce en la superficie de las lagunas.

Los índices de saturación deducidos de la aplicación de WQ4F al agua libre de las lagunas y al agua extraída a las profundidades de 30 y 60 cm se presentan en la Figura 81. Desde el punto de vista de las actividades iónicas (datos no presentados), los resultados que se deducen son conceptualmente similares a los obtenidos para las aguas lagunares presentadas en la Tabla 74: actividades relativamente bajas de los iones

bicarbonato y calcio, medias para sulfato y elevadas para magnesio y, en particular, sodio y cloruro. Dichas actividades aumentan con la profundidad, tal como era lógico esperar de los valores de CE presentados anteriormente.

La Figura 81 indica que los índices de saturación de las aguas libres son ligeramente inferiores a los del agua extraída a 30 cm en el sedimento y claramente inferiores a los de 60 cm. No existen diferencias apreciables en las saturaciones de anhidrita y yeso para una determinada laguna, pero como conjunto (Tabla 79) se caracterizan por la disminución del número de lagunas saturadas en estos dos minerales a medida que se profundiza en el sedimento. Existen determinados casos (Pueyo) en que la saturación mineral es mayor en el agua libre y a 60 cm. mientras que en el espacio intermedio hay subsaturación. Las mayores diferencias se observan en la saturación en dolomita, huntita y magnesita, ya que el porcentaje de lagunas saturadas o sobresaturadas es mucho mayor en profundidad que en el agua libre.

Tabla 79. Porcentaje de lagunas que presentan saturación en determinados minerales en el agua libre de las lagunas y en el agua intersticial del sedimento a 30 cm y 60 cm de profundidad.

	ANHIDRITA	CALCITA	DOLOMITA	YESO	HUNTITA	MAGNESITA
Agua	100	64	73	100	27	56
30 cm	76	14	79	64	56	76
60 cm	71	36	93	57	73	93

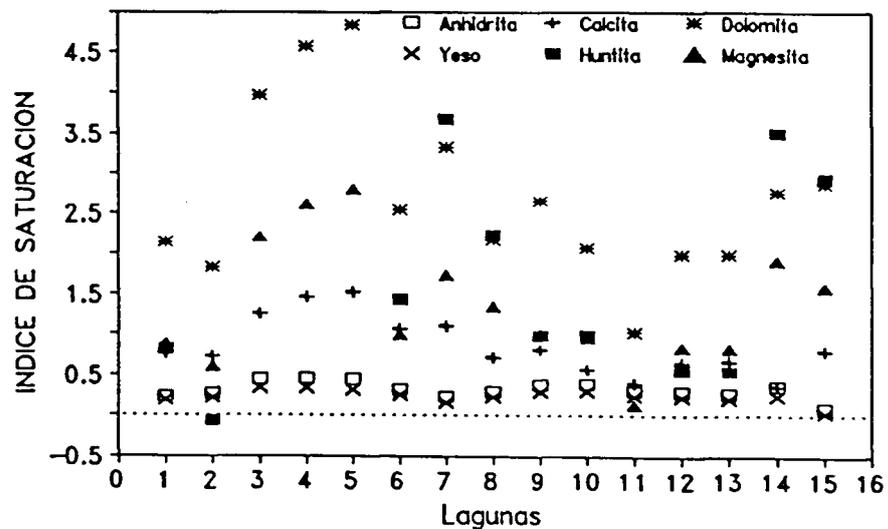


Figura 80. Valores del índice de saturación (IS) en varios minerales, calculados por WATEQ a partir de la composición media (período 1987-1990) de las aguas de quince lagunas de Monegros: (1) Amarga I; (2) Amarga II; (3) Camarón; (4) Guallar; (5) Muerte; (6) Pez; (7) Piñol; (8) Pito; (9) Playa; (10) Pueyo; (11) Rebollón; (12) Rollico; (13) Saladar; (14) Salineta y (15) Salobral.

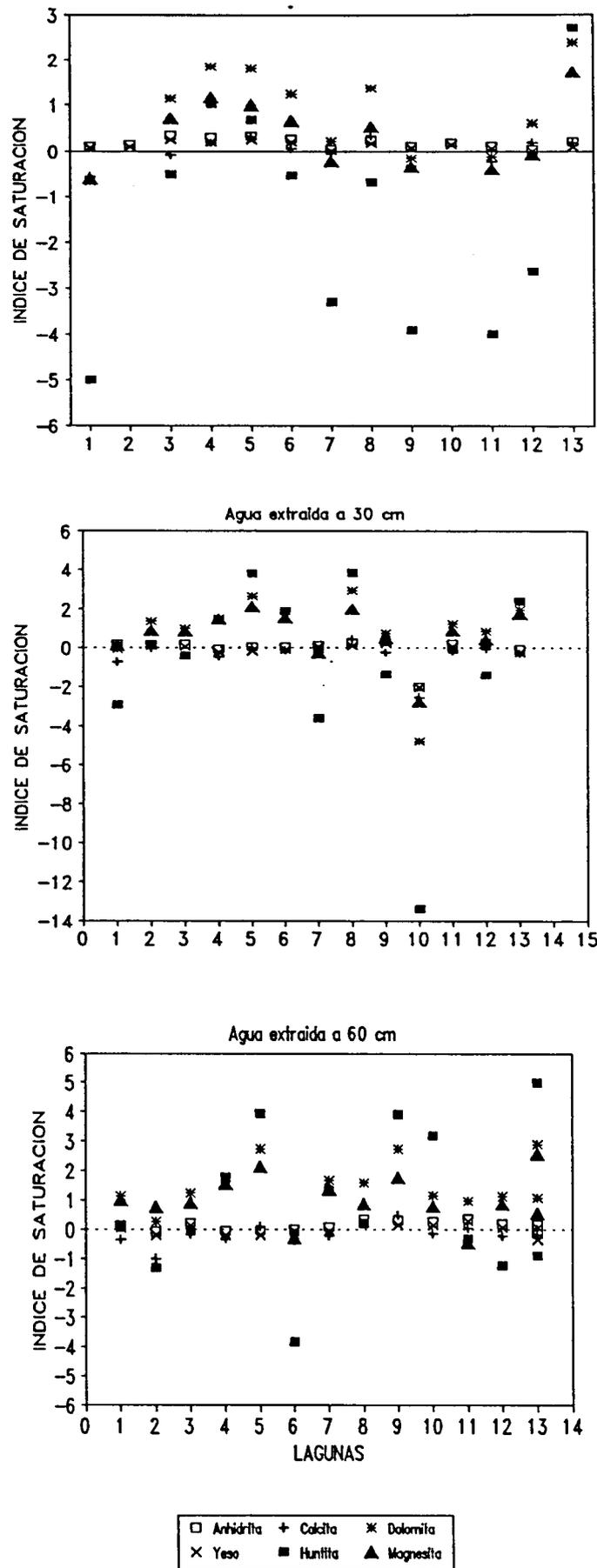


Figura 81. Valores del índice de saturación (IS) en varios minerales, calculados por WATEQ a partir de la composición iónica del agua libre y del agua extraída del sedimento a 30 y 60 cm de profundidad.

5.4.4. Río Ebro

En la Tabla 80 se presenta la CE del agua muestreada en cinco fechas de muestreo en los once puntos de control del tramo del río Ebro entre Zaragoza y el embalse de Mequinenza. Asimismo, se presentan los caudales de las estaciones de aforo de Zaragoza y Sástago (red de Aforos del MOPU) a efectos de interpretar las variaciones de CE entre muestreos.

Tabla 80. Río Ebro: CE (dS/m a 25°C) de las aguas en once puntos de control y cinco fechas de muestreo. Se presentan asimismo para dichas fechas los caudales (m³/s) de las estaciones de aforo (Zaragoza y Sástago) situadas en el tramo estudiado.

PUNTOS	Km	Julio 1987	Marzo 1988	Sepbre. 1988	Julio 1989	Marzo 1990	Media (CV%)
Q ZARAGOZA	0	116.0	239.0	89.0	29.0	407.0	
MOVERA	3	1.86	1.73	2.41	1.63	1.40	1.80 20
PASTRIZ	8	1.89	1.77	2.43	1.65	1.70	1.88 17
P.PINA	15	1.85	1.77	2.39	1.68	1.42	1.82 19
OSERA	26	2.05	1.95	2.40	1.84	1.53	1.95 16
PINA	32	2.09	1.92	2.53	1.84	1.46	1.96 20
GELSA	48	2.21	1.93	2.63	1.84	1.50	2.02 21
Q SASTAGO		139.0	237.0	78.0	33.0	-	2.02
SASTAGO	72	2.14	2.04	2.72	1.95	1.29	25
ESCATRON	92	2.12	2.02	2.65	1.94	1.47	2.04 20
CHIPRANA	112	2.19	2.03	2.22	1.94	1.26	1.93 20
CASPE	120	1.90	1.80	2.18	1.71	1.11	1.74 22
EMBALSE		1.98		1.47		1.63	-
MEDIA CV %		2.02 6	1.89 6	2.36 14	1.80 7	1.43 12	

De esta Tabla se deduce que los valores medios en el tramo estudiado varían entre 1.4 y 2.4 dS/m, y que la CE aumenta en un 13% entre Zaragoza y Escatrón, estación a partir de la cual la CE vuelve a descender apreciablemente. Asimismo, se observa una evolución de la CE similar en los muestreos de Julio 87, Marzo 88 y Julio 89. En Septiembre de 1988 se han registrado los valores máximos de CE, a pesar de que el caudal en Julio de 1989 fue inferior. Los elevados valores de Septiembre de 1988 podrían atribuirse, al menos en parte, a que ésta es una época en la que una componente importante del caudal circulante por el Ebro son retornos del regadío que, típicamente, tienen una mayor salinidad que las correspondientes aguas de riego. En Marzo de 1990 se han medido las conductividades eléctricas mínimas que en este caso sí van asociadas a caudales máximos.

Aunque las relaciones Q-CE son coherentes con resultados previos deducidos por Aragüés y Alberto (1983), los descensos de CE detectados a partir de Sástago o Escatrón, según muestreos, sugieren la existencia de aportaciones de agua al río en este tramo de menor concentración salina. Asimismo, se observa un descenso de la CE en el embalse, posiblemente asociado al tiempo de residencia del agua en el mismo, que permite la mezcla de aguas de verano y de invierno.

Los valores de CE medidos son, en general, relativamente elevados y susceptibles de afectar negativamente al rendimiento de cultivos sensibles a la salinidad, tales como árboles frutales, hortalizas y maíz (Royo y Aragües, 1990).

Si se normaliza la CE obtenida en cada punto de control con respecto a la CE del punto inicial (Movera) y se representa esta relación (CE_i/CE_{Movera}) frente al recorrido del río Ebro (Km), se obtienen los incrementos relativos de CE para cada tramo, así como por Km de río (Figura 82). La evolución de la CE normalizada a lo largo del Ebro es conceptualmente similar en todos los muestreos (excepto en Marzo de 1990): un primer tramo hasta el Km 15 donde el incremento de salinidad es pequeño; un segundo tramo, con una meseta en tres de los muestreos, hasta el Km 90-100, donde se producen los máximos incrementos de salinidad, y un tercer tramo con un descenso acusado de la CE. De estos muestreos se deduce que los mayores incrementos de CE por Km del río se producen entre el Km 15 y 26 (incrementos medios de 0.022 dS/m x Km). Los resultados del muestreo de Marzo de 1990 son muy diferentes, ya que se observa a partir de Pastriz (Km 8) un descenso prácticamente sistemático de la CE con el recorrido del Ebro. El elevado caudal del Ebro en dicha fecha puede estar relacionado con dicho comportamiento atípico.

En el tramo de río relacionado con Monegros II no se ha detectado ningún ascenso de CE que pueda ser atribuido a una descarga subterránea procedente de ese sistema. Sin embargo, dicho tramo se corresponde en su mayor parte con el embalse de Mequinenza, lo que impide detectar posibles ascensos hipotéticos de CE.

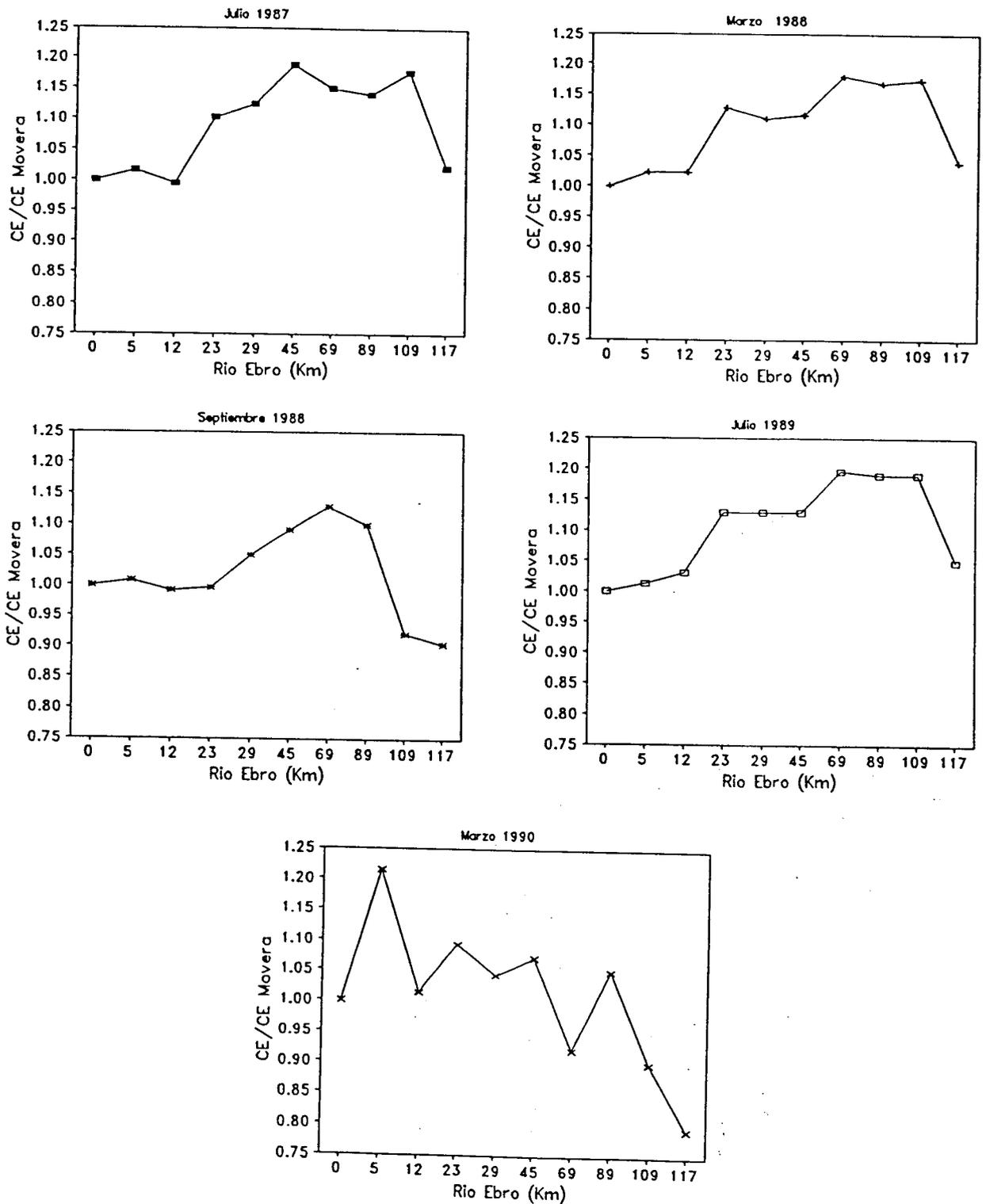


Figura 82. Río Ebro: variación de la CE normalizada (CE/CE_{Movera}) del tramo medio del río Ebro en cinco fechas de muestreo.

En la Figura 83 se presenta la variación de la CE y T° del agua muestreada en superficie y a 20 m de profundidad desde la presa a la cola del embalse (Caspé) en Febrero de 1990. La CE asciende sistemáticamente, tanto en superficie como en profundidad, desde el Pte. de Caspe hasta la presa. Aunque no puede descartarse que dichos incrementos sean debidos, al menos en parte, a aportes subterráneos procedentes de Monegros II, dado que el muestreo se efectuó en Invierno, este comportamiento podría explicarse más fácilmente por aportaciones al embalse de agua dulce y por el elevado tiempo de residencia del agua en el mismo, que haría que las aguas más próximas a la presa procedieran de períodos con aguas de mayor CE y sujetas a un mayor tiempo de evaporación. Así, los valores obtenidos en los dos puntos de control más próximos a la presa son los más elevados (2.4 dS/m). El ligero aumento de la CE en profundidad podría atribuirse a la mayor densidad del agua salina y a la posible descarga de aguas subterráneas salinas. Sin embargo, su localización resulta complicada por el efecto regulador de las aguas embalsadas. De hecho, no se detectan ni siquiera algunas de las descargas conocidas, como la descarga a través del Bco. de Valcuerna que aporta aguas de CE muy superiores a las del embalse.

Se aprecia asimismo un gradiente negativo de la temperatura con la profundidad, que se manifiesta en todos los puntos de control pero, debido a que cuantitativamente es poco importante ($< 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$), es arriesgado atribuirlo a una descarga subterránea de aguas más frías.

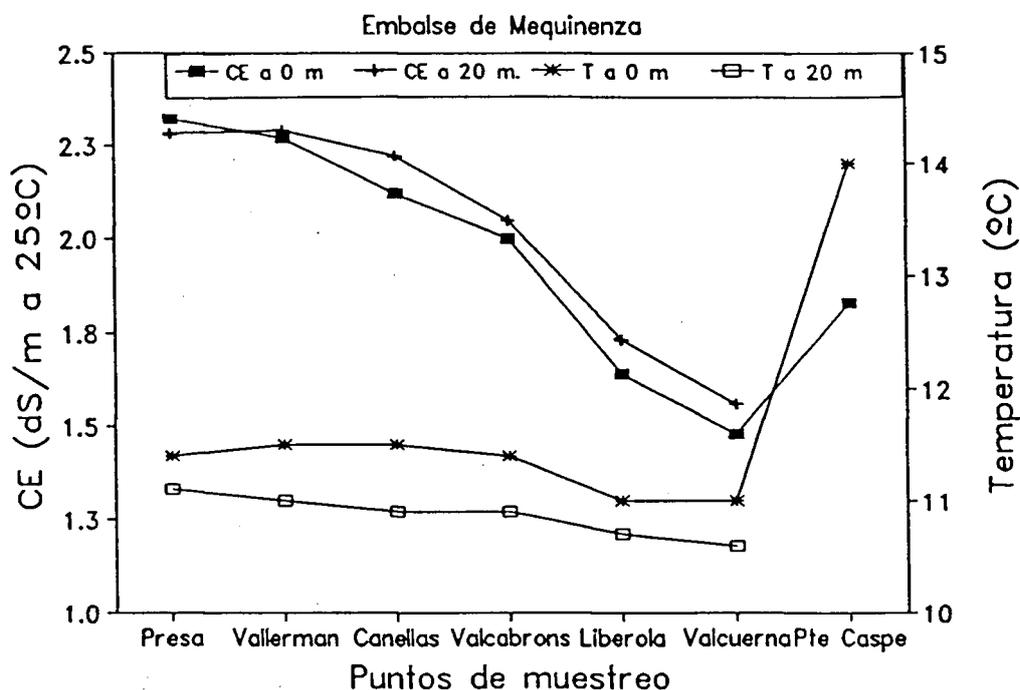


Figura 83. Río Ebro: variaciones de CE y temperatura a profundidades de 0 y 20 m en el embalse de Mequinenza, desde la presa de Mequinenza hasta el puente de Caspe.

En definitiva, el seguimiento de la CE en este tramo del río Ebro y en el embalse de Mequinenza, que limitan con las tierras que van a ser transformadas en regadío en Monegros II, no ha permitido apreciar una existencia relevante de descargas subterráneas salinas. A pesar de ello, no puede descartarse su existencia, ya que las permeabilidades de los materiales que albergarían estas aguas subterráneas y las reservas de agua en los mismos son de una magnitud tan pequeña que su detección por los métodos utilizados resulta inviable con los caudales circulantes en el río Ebro y con los grandes volúmenes de agua embalsados en Mequinenza.