

- (9)
5. CONFERENCIA SOBRE HIDROLOGIA GENERAL Y APLICADA  
5. SALON MONOGRAFICO DEL AGUA - SMAGUA/83 - ZARAGOZA

## Ponencia 2.

### LA SALINIZACION

---

**Ramón ARAGÜES LAFARGA**

Jefe del Departamento de Suelos y Riegos,  
del Centro de Investigación y Desarrollo Agrario del Ebro.

**Francisco ALBERTO JIMENEZ**

Investigador Científico, del C.S.I.C. - Estación Experimental de Aula-Dei.  
ZARAGOZA

## CURRICULUM VITAE

Ramón ARAGÜÉS LAFARGA nació en Zaragoza el 14 de Marzo de 1950. Cursó estudios superiores en la Universidad de Zaragoza, obteniendo la Licenciatura en Químicas en 1973. En 1975 fue becado por el I.N.I.A. (Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias) para ampliar estudios en Estados Unidos, y obtuvo el Master en Ciencia del Agua por la Universidad de California, Davis, en 1977. En 1982 obtuvo el Doctorado en Ciencias por la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad de Zaragoza.

En 1977 fue contratado por el I.N.I.A., pasando a ser funcionario propio de Carrera en 1978 y Jefe del Departamento de Suelos y Riegos del CRIDA-03 en 1980.

A lo largo de su carrera ha impartido un buen número de conferencias y comunicaciones a Congresos y ha participado en cursos de su especialidad, como el "Curso Internacional de Riego por Goteo" (CRIDA-11, Tenerife), "Curso de Ordenación del Territorio" (ETSIA, Lérida), "Curso Internacional de Fruticultura" (CRIDA-03, Zaragoza) y "Curso Internacional de Riego" (CRIDA-10, Córdoba).

Ha participado en diversos proyectos de investigación, entre los que cabe destacar el titulado "Calidad de las aguas continentales y marítimas. Delta del Ebro", del que es investigador principal junto con el Dr. Francisco Alberto (Estación Experimental de Aula Dei).

### Publicaciones

- ARAGÜÉS, R. 1975. Recuperación de suelos salinos en la Cuenca del Ebro. Tesina de Licenciatura. Universidad de Zaragoza. Facultad de Ciencias. 87 p.
- ARAGÜÉS, R. 1977. Behaviour of soil salinity sensors. M.Sc. thesis. U.C. Davis. Campus Library, 98 p.
- ARAGÜÉS, R. y ALBERTO, F. 1978 a. El proceso de recuperación de dos suelos salinos de la D.M.E. I. Evolución de la conductividad eléctrica, conductividad hidráulica y pH durante el lavado. An. Est. Exp. Aula Dei. 14 (112): 230-244.
- ARAGÜÉS, R. y ALBERTO, F. 1978 b. El proceso de recuperación de dos suelos salinos de la D.M.E. II. Dinámica de las sales durante el lavado. An. Est. Exp. Aula Dei, 14 (112): 245-258.

- ARAGÜÉS, R.; ALBERTO, F.; CUCHI, J.A. y MACHIN, J. 1979. Calidad de agua para el riego. I. Criterios Generales. ITEA, 37: 3-17.
- ALBERTO, F.; ARAGÜÉS, R.; MACHIN, J. y CUCHI, J.A. 1980. Calidad de agua para el riego. II. Aplicación a aguas de la depresión del Ebro. ITEA, 38: 55-71.
- GOMEZ APARISI, J.; FACI, J.; ARAGÜÉS, R. 1981. Optimización del riego en frutales. I. Relaciones agua-planta-suelo. An. Aula Dei, 15 (3-4): 315-331.
- FACI, J.; ARAGÜÉS, R.; GOMEZ APARISI, J. 1981. Optimización del riego en frutales. II. Necesidades hídricas y régimen de riego. An. Aula Dei, 15 (3-4): 343-358.
- ARAGÜÉS, R.; FACI, J. y GOMEZ, J. 1981. Optimización del riego en frutales. III. Riego y salinidad. An. Est. Exp. Aula Dei, 15 (3-4): 387-401.
- ARAGÜÉS, R. 1982. Factors affecting the behaviour of Soil Salinity Sensors. Irrig. Sci. (1982), 3: 133-147.
- ARAGÜÉS, R. 1982. Medida "in-situ" de la salinidad del suelo: - aplicación al movimiento de iones inorgánicos en procesos de ascenso capilar y lavado con nivel freático constante. - Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza. 282 p.

## CURRICULUM VITAE

Francisco ALBERTO GIMENEZ nació en Biscarrués (Huesca) en 1933, hijo de Santiago Alberto Navarro, farmacéutico, y de Julia Giménez Mongiód. Vivió en Ansó (Huesca) y en Borja (Zaragoza).

Estudió el Bachillerato en Borja y Zaragoza, terminándolo en el curso 1950-1951. Licenciado en Farmacia en 1957 en Santiago de Compostela, en 1962 alcanzó el grado de Doctor en la misma Facultad.

En el curso 1958-1959 fue Prof. Adjunto de Fisiología Vegetal en la Facultad de Farmacia y posteriormente Prof. Ayudante de Clases prácticas y en 1962 y 1963 Prof. Adjunto de Geología Aplicada en la misma Facultad. En 1969 y 1970 fue Profesor encargado del curso de Edafología en la Universidad de Navarra (Pamplona).

En 1963 accedió a una plaza de plantilla como personal investigador del C.S.I.C. Durante 1964-1965 permaneció becado en el Institut für Bodenkunde de la Universidad de Bonn (Alemania) y en 1966 se incorporó a la Estación Experimental de Aula Dei del C.S.I.C. en Zaragoza.

### Publicaciones

- "Los cationes y el complejo de cambio de suelos pratenses gallegos". Tesis Doctoral 1962. An. Est. Exp. Aula Dei 8, nº 3-4 (1967): 257-339.
- en colab. con M.M. TABOADELA. "Granulación específica de algunos tipos de suelos cantábricos". II Reunión de Sedimentología (1961): 179-184.
- en colab. con M.M. TABOADELA y J.M. ALBAREDA. "Suelos de las montañas cantábricas". Presentada al Congreso Internacional de Estudios Pirenaicos (1962). An. Est. Exp. Aula Dei 8, nº 3-4 (1967): 340-349.
- en colab. con G. JARITZ. "Amorphe und kristalline Bestandteile einiger typischer Bodenbildungen Skandinaviens". Zeits. Pflanz. Düng. Bod. 114 (1966): 27-45.
- "Fraccionamiento del Fe y Mn del suelo por medio de un gradiente de concentración I. Empleo del HCl". An. Est. Exp. Aula Dei 9 (1968): 51-73.
- con I. MURILLO. "Estudio comparativo del pirofosfato oxalato y HCl en gradiente de concentración como extractantes de formas de Fe en suelos". An. Est. Exp. Aula Dei 10, nº 3-4 (1969): 922-935.

- Id. "Fraccionamiento del Fe y Mn en algunos tipos de suelos de Urbasa por medio de HCl en gradiente de concentración". An. Est. Exp. Aula Dei 10, n° 3-4 (1969): 905-921.
- con A. GARCIA DE JALON. "Comparación de métodos de fraccionamiento de formas de oxihidróxidos de hierro y manganeso en suelos y productos de síntesis". An. Est. Exp. Aula Dei 11 (1/2): 125-152 (1971).
- con L. MONTAÑES. "Puntos de equilibrio agua-suelo en los suelos pardos de costra caliza de la Depresión del Ebro". An. Est. Exp. Aula Dei 11 (1/2): 106-125 (1971).
- "Considérations sur la pierrosité des sols bruns à croûte calcaire du Bassin de l'Ebre". Bull. Rech. Agron. de Gembloux - - (Hors série). Semaine d'Etude des Problèmes Méditerranéens - - (1971): 180-185.
- en col. con M. MARTIN BUENO. "Análisis de argamasas romanas. I. Cisternas de Bilbilis". Actas de las I Jornadas Metod. Aplic. Cienc. Histor. Santiago de Compostela: 207-214.
- en col. con A. GARCIA DE JALON y T. ALEIXANDRE. "Estudio sedimentológico del relleno de la cueva de Los Casares (Riba de Saelices, Guadalajara). Excavaciones arqueológicas en España 76: 85-96.
- en col. con J. MACHIN. "Delimitación de áreas de suelos con régimen de humedad árido en la Depresión Media del Ebro". Trab. Compostelanos de Biología 6: 47-56.
- en col. con J. MACHIN. "Mapa de Suelos de España a escala 1: 500.000 e investigación de sus unidades cartográficas". Provincia de Huesca. En prensa.
- en col. con J. MACHIN. "Mapa de Suelos de España a escala 1: 500.000 e investigación de sus unidades cartográficas". Provincia de Lérida. En prensa.
- en col. con J. MACHIN. "Mapa de Suelos de España a escala 1: 500.000 e investigación de sus unidades cartográficas". Provincia de Zaragoza. En prensa.
- en col. con J. MACHIN y J.A. CUCHI. "Niveles de boro en suelos salinos de la Depresión Media del Ebro". Anuario del C.E.B.A. Vol. homenaje al Prof. Lucena Conde. 249-265, 1977.
- en col. con J. MACHIN. "Estudio sedimentológico de los materiales de relleno del abrigo de Botiquería del Moros". Excavaciones arqueológicas. En prensa.
- en col. con J. MACHIN y J.A. CUCHI. "Estudio sedimentológico del relleno de la Cueva del Asno (Soria)". Excavaciones Arqueológicas.
- en col. con J. MACHIN. "Relación entre niveles de contaminación del suelo por compuestos de magnesio, viento dominante y

pluviometría en la proximidad de una planta de calcinación de magnesita". Pub. Centr. Pir. Biol. exp. 7 (1): 73-84 (1976).

- en col. con R. ARAGÜES. "El proceso de recuperación de dos suelos salinos de la Depresión Media del Ebro. I. Evolución de la conductividad eléctrica, conductividad hidráulica y pH durante el lavado". Anales Est. Exp. Aula Dei 14 (1/2): 230-244 (1978).
- en col. con R. ARAGÜES. "El proceso de recuperación de los suelos salinos de la Depresión media del Ebro. II. Dinámica de las sales durante el lavado". An. Est. Exp. Aula Dei 14 (1/2): 245-258 (1978).
- en col. con R. ARAGÜES, J. MACHIN y J.A. CUCHI. "Calidad de agua para el riego. I. Criterios Generales". Comunicaciones X Jornadas AIDA. 1978.
- en col. con R. ARAGÜES, J. MACHIN y J.A. CUCHI. "Calidad de agua para el riego. II. Aplicación a aguas de la Depresión del Ebro". Comunicaciones X Jornadas AIDA. 1978.

#### Libros y Monografías

- en col. con M.M. TABOADELA, F. GUITIAN, T. CABALLAS. "Memoria del Mapa de suelos de Asturias".
- colaborador en el "Mapa de suelos de España a escala 1:100.000". Instituto Nacional de Edafología y Agrobiología J.M. Albareda. CSIC.

#### Otras publicaciones

- "Propiedades de cambio y cationes de cambio de la zona de enraizamiento de los suelos de prado de Galicia". Presentada a la II Reunión Española para el Estudio de los Pastos.
- en colab. con J. MENDEZ. "Algunas probables relaciones entre condiciones del suelo y ciertas especies herbáceas". Presentada a la II Reunión Española para el Estudio de los Pastos.
- en colab. con A. ABADIA, L. MONTAÑES, M. SANZ, J. APARICIO. "Bardenas Reales de Navarra. Estudio de apreciabilidad de suelos para puesta en riego". Octubre 1969 (Confidencial).
- "Rendimiento de remolacha, trigo, alfalfa y maíz en relación con la profundidad de suelo para los suelos pardos de costra caliza". 95 pág. Memoria del trabajo realizado para el I.N.C.
- "Estudios sobre polución de los suelos con polvos ricos en compuestos de magnesio. Zona media del valle de Esteribar (Navarra)". Memoria trabajo realizado para la empresa Magnesitas Navarras, S.A.
- en col. con S. MENSUA, M.J. IBAÑEZ, M. YETANO. "Memoria y Guía

de excursiones de la III Reunión Nacional del Grupo de trabajo del Cuaternario". Zaragoza, Sept. 1977.

- en colab. con J. MACHIN, J.A. CUCHI, R. POZA. "Memoria y Guía de las excursiones científicas de la VIII Reunión Nacional de Suelos". Zaragoza, Septiembre 1979.
- "Guía para la descripción morfológica de perfiles de suelos en el campo". 105 pág. Mimeografiado.
- en colab. con J. MACHIN. "Contaminación de suelos procedentes de la calcinación de magnesitas (Rubián, Lugo)". Parte I. Situación actual y estimación de indemnizaciones. 32 pág. 1979.
- Id. Parte II. Diagnóstico del problema y planteamiento de la recuperación. 141 pág. 1979.
- en colab. con M. GUTIERREZ ELORZA, M.J. IBÁÑEZ et al. "El Cuaternario de la Depresión del Ebro en la Región Aragonesa". 230 pág. 1982. Premio-ayuda a la investigación de la Universidad de Zaragoza.

#### Tesinas de Licenciatura dirigidas

- "Distribución del magnesio aportado a los suelos en las proximidades de una planta de calcinación de magnesita". (1975).
- "Lavado de sales y modificación de propiedades físico-químicas de dos suelos salinos de la Cuenca Media del Ebro". (1975). Facultad de Ciencias de Zaragoza.

#### Tesis Doctorales dirigidas

- "Fraccionamiento de los óxidos de hierro en suelos, sedimentos y productos de envejecimiento del gel pardo". (1977). Facultad de Ciencias de Zaragoza.
- "Contaminación de suelos por polvos procedentes de una planta de calcinación de magnesita". (1979). Facultad de Farmacia de Santiago de Compostela.
- "Medida 'in-situ' de la salinidad del suelo: Aplicación al movimiento de iones inorgánicos en procesos de ascenso capilar y lavado con nivel freático constante". Facultad de Ciencias de Zaragoza.

## I - PROCESOS DE LA SALINIZACION DE LAS AGUAS

Las aguas naturales, tanto superficiales como profundas, llevan sales disueltas procedentes de los materiales con que han entrado en contacto.

Cualquier manipulación del agua en usos domésticos, industriales, reestructuración de la red natural, trasvase entre cuencas, retención en pantanos, riego, producción de energía térmica o nuclear, etc., conlleva un aumento de su concentración salina, por evaporación de una parte de la misma (en general sin cambio apreciable en la composición iónica) o por adición de nuevos iones procedentes de los materiales que se han manipulado con ella, algunos de los cuales pueden ser tóxicos.

Los órdenes de magnitud de estos incrementos se cifran para efluentes urbanos entre 300 y 350 mg/l (Pillsbury, 1981) y según Meybeck (1979) suponen por término medio, para diversos ríos importantes con variada actividad humana e industrial (Mississippi, San Lorenzo, Rin, Sena, Oder y Vístula), unos 378 kg/año y habitante. Por otro lado, los aportes salinos procedentes del regadío han sido evaluados en el río Colorado entre 0 y 5 toneladas por ha (USDI, 1981).

En conclusión, puede afirmarse que las aguas tienden irreversiblemente a su salinización con cada nuevo ciclo de uso y vertido.

Los efectos negativos de la salinidad sobre la salud y sobre los usos domésticos, industriales y agrícolas son evidentes: en diversos países, ciertos niveles de salinidad se han correlacionado positivamente con incidencia de litiasis e hipertensión y negativamente con la incidencia de infarto de miocardio; como consecuencia de la baja calidad se producen gastos adicionales para la adquisición de aguas de bebida, mayores cantidades de jabones, etc., así como mayores gastos de mantenimiento en las partes metálicas de las conducciones de agua. La industria precisa mayores gastos en desincrustantes y ablandantes y en el mantenimiento de las instalaciones; finalmente, la agricultura se ve afectada por los incrementos salinos de las aguas

de riego a través del descenso en los rendimientos de los cultivos tradicionales, aumento de las necesidades de agua y/o una desviación hacia cultivos más resistentes, generalmente menos apreciados.

A efectos ilustrativos, para la cuenca del río Colorado, donde se han estudiado minuciosamente las pérdidas debidas al incremento de salinidad del río, se ha concluido que cada mg/l de incremento de concentración del agua en la Presa Imperial supone unos costes adicionales de 450.000 \$ de 1980; - un tercio de esta cantidad son pérdidas en la agricultura.

Debido a las condiciones geológicas y climáticas de la Depresión del Ebro, el contenido en sales de las aguas del tramo medio y final del río es en la actualidad alto, por lo que los incrementos de salinidad que se producen con su uso (no olvidemos que el río es a la vez fuente de agua y canal de desagüe) pueden ocasionar problemas serios a los usuarios.

Dada la irreversibilidad de este proceso, hemos de aprender a convivir con el problema de la salinización de las aguas, lo que en modo alguno debe significar aceptar pasivamente sus efectos perjudiciales ni limitar el uso del agua, sino buscar entre las posibles soluciones la más viable para minimizar los aportes salinos, tanto de origen natural como los derivados del uso del agua.

La consecución de estos objetivos sólo es posible a través de una investigación minuciosa del origen de las sales, de su cuantificación y del estudio de su variabilidad espacial y temporal.

La Cuenca del Ebro cuenta con una red permanente de vigilancia de la calidad de las aguas controlada por la Comisaría de Aguas del Ebro (MOPU), que lleva desarrollando esta labor desde hace más de 20 años, al principio con unos pocos puntos de control y actualmente con más de 65. La mayor parte de lo que en la comprensión del problema de la salinidad del Ebro hemos alcanzado lo debemos al trabajo de este organismo.

La salinidad de los ríos de la Cuenca no es un parámetro constante, sino que varía al menos en cuatro campos diferentes: en relación con el caudal, estacional, interanual y espacial.

#### Variabilidad ligada a los caudales

El caudal y la salinidad que transporta un río dependen de las contribuciones relativas de aportes subterráneos y subsuperficiales, más constantes y de peor calidad, y de las escorrentías de precipitación de mejor calidad pero más esporádicas. En el río Ebro estos mecanismos se ponen de manifiesto en la aparición de tres grupos o familias de curvas, según sea el coeficiente de correlación entre caudales y salinidad, negativo, nulo o positivo (Figura 1).

El grupo más representado es aquel con coeficiente de correlación negativo, más frecuente en el centro de la Depresión y en el que se evidencian diferencias entre calidad de las aguas subterráneas.

Un segundo grupo, con correlación cero o próxima a él, y cuyas causas son muy variadas, unas naturales (en las cabeceras de las cuencas los aportes freáticos son escasos o de composición semejante a las escorrentías) y otras antrópicas como consecuencia de la homogeneización de la calidad en los embalses o aquellas en las que, con el régimen natural de aportes, se mezclan los efluentes y sobrantes del riego.

El tercero de los grupos corresponde a estaciones en las que la correlación entre ambos parámetros es positiva. La explicación reside en causas na

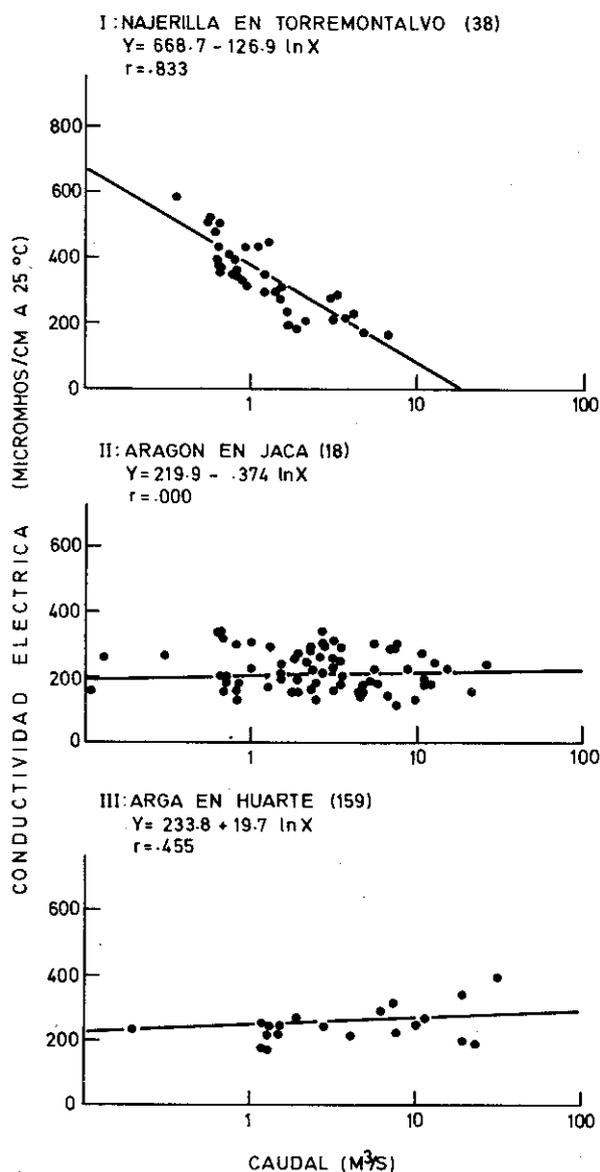


Figura 1. Familias de curvas caudal-CE. Ejemplos representativos.

turales o antrópicas, según las cuales sobre una situación de base como la anterior (correlación nula) las escorrentías superficiales, cargadas con las sales procedentes de contaminación industrial de los suelos o con sales solubles naturales, fundamentalmente yesos, modifican la tendencia.

La conclusión más general de toda esta variabilidad es que en momentos de bajos caudales la calidad de la gran mayoría de las aguas de la cuenca empeora.

### Variabilidad estacional

Asociado a este ciclo de fluctuaciones de caudales, se manifiesta en diversos puntos de la cuenca un ciclo estacional de la calidad (Fig. 2) con unos máximos de concentración salina coincidentes con los períodos de máxima demanda para riegos y urbana (Ebro en Zaragoza y Ebro en Escatrón). Por el contrario, en otras la calidad permanece constante (Ebro en Miranda). Finalmente, en otras estaciones, como el Cinca en Fraga, la explicación de esta variabilidad estacional es más compleja.

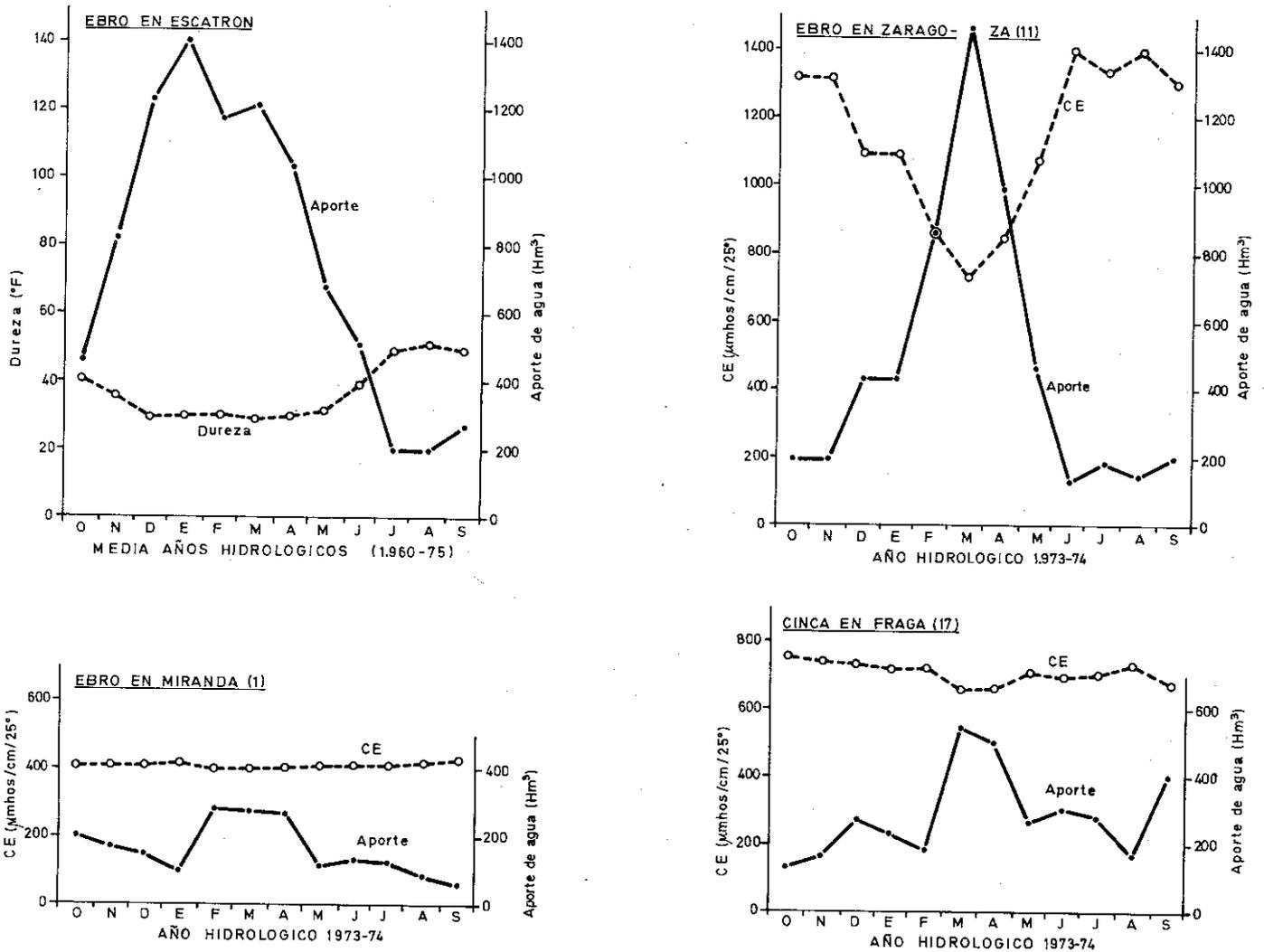


Figura 2. Variación estacional de caudales y salinidad de las aguas. Ejemplos representativos.

### Variabilidad interanual

Existe también un ciclo de calidad condicionado por las variaciones interanuales de las precipitaciones en la cuenca.

En este sentido, la figura 3 recoge las dos series de datos más completas de que se dispone: las de suministro a Zaragoza - que representan la calidad de las aguas en Pignatelli - realizada a partir de datos proporcionados por el Excmo. Ayuntamiento (Laboratorio Municipal de Higiene, Estación Depuradora de Aguas) y las correspondientes a la calidad del agua en Escatrón, proporcionados por la Central térmica, y que representan medias anuales obtenidas de valores diarios y por tanto de gran consistencia.

Sobre esta fluctuación interanual se puede observar una tendencia al incremento de la salinidad y de la cual hablaremos más adelante, en el capítulo de curvas de tendencia salinidad-tiempo.

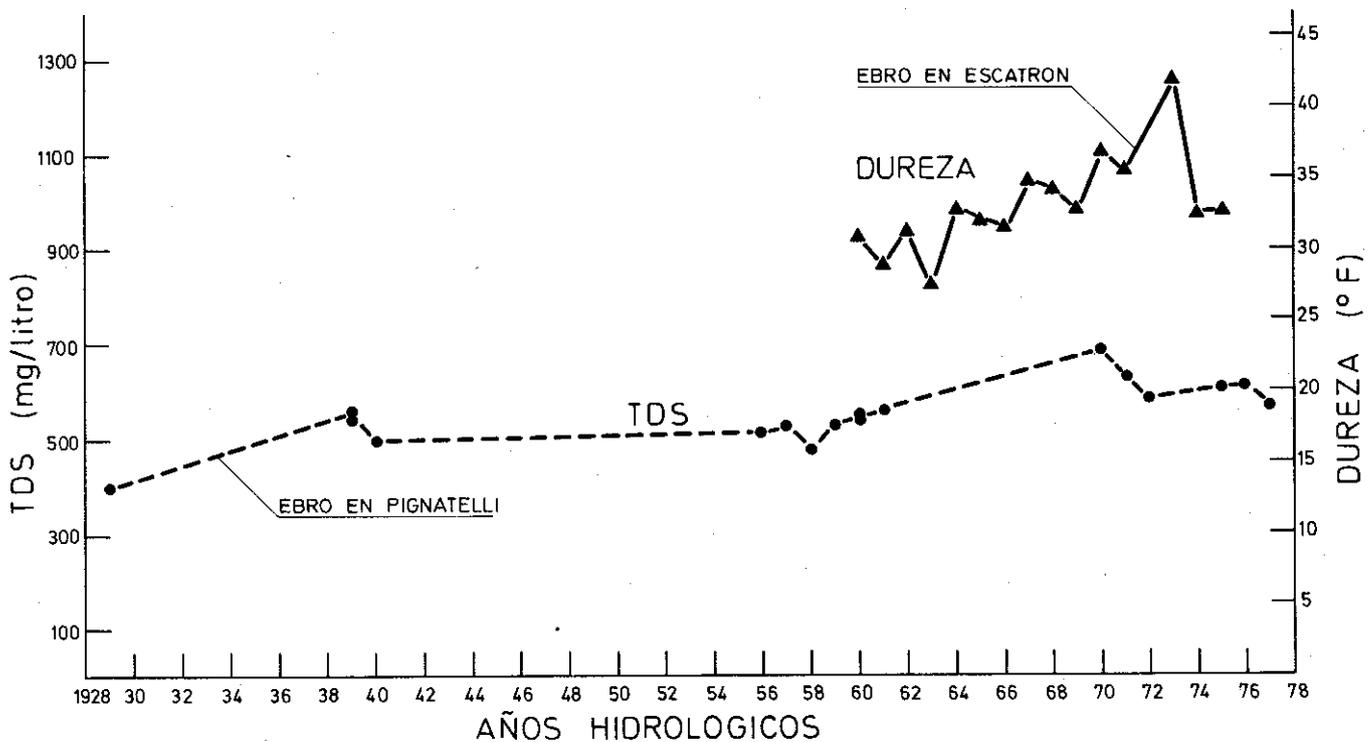


Figura 3. Fluctuación interanual de la salinidad del Ebro en Pignatelli y Escatrón.

### Variabilidad espacial

La conjunción de factores que deciden el nivel salino de las aguas de la cuenca (clima, geología, vegetación, suelos y acción antrópica) se interrelacionan para darnos una distribución espacial como la de la Figura 4, en la que se presentan las isolíneas de concentración salina expresada como CE en micromhos/cm/25°.

Una vez vista la variabilidad puntual y espacial de la salinidad, consideraremos a continuación las fuentes y sumideros de las sales a través de un análisis global de la red de afluentes y calidad de aguas, que llamaremos balance hidrosalino.

Partiendo de las curvas de correlación semilogarítmica entre caudales y concentraciones (Tabla 1) y de los histogramas de afluentes de los años hidrológicos correspondientes, se han calculado, para cada estación con información suficiente, las  $T_m$  de sal, el aporte de agua y la concentración salina (TDS, sólidos disueltos totales). La Figura 5 recoge esta información sobre un esquema hidrológico del Ebro y afluentes, para el valor promedio de los años hidrológicos 1973-74, 1974-75 y 1976-77 que tuvieron aportes en Tortosa semejantes a la media del período de registro de datos (11825, 13701 y 15476  $Hm^3$  respectivamente). De esta media se excluyó el año hidrológico 1975-76 por ser especialmente seco (aporte en Tortosa de 8455  $Hm^3$ ).

En este esquema se hacen notar las altas concentraciones salinas del Arba (890 mg/l), Martín (1128 mg/l) y tramo final del Gállego (623 mg/l). Estos mismos ríos dan los mayores valores de concentración para cortos períodos de tiempo: 1660 mg/l para el Arba en los meses de invierno y unos 2000 mg/l para el Martín y Gállego. Por otro lado, resulta evidente el incremento de concentración que se observa en el cauce principal del Ebro. Ello es debido no sólo a causas naturales, sino también al sucesivo uso y reciclado del agua. La calidad del Ebro mejora tras la desembocadura del Cinca y Se-

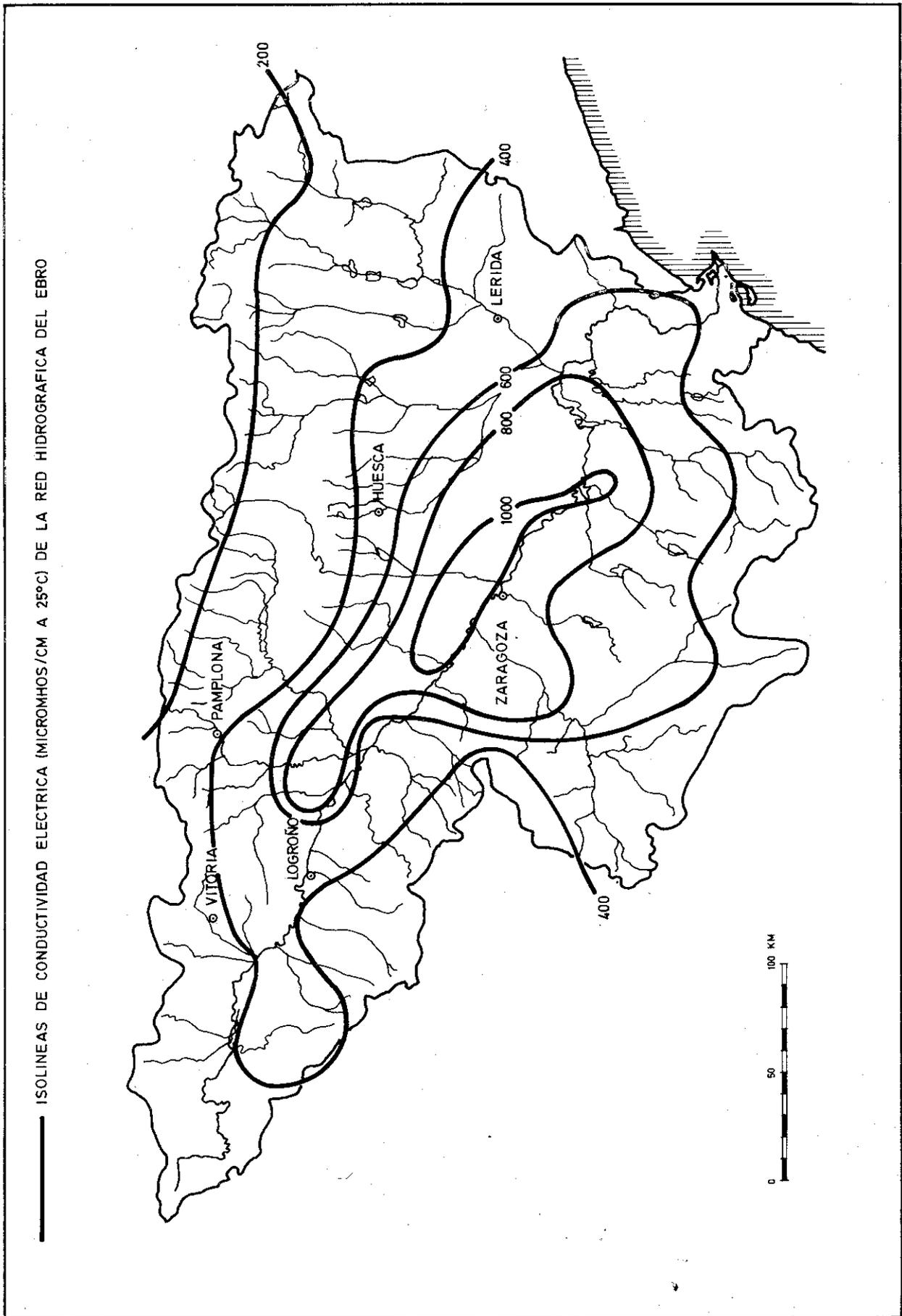


Figura 4. Distribución espacial de la salinidad del agua en la Cuenca.



TABLA 1

Ecuaciones de regresión caudal-concentración de las estaciones de la Cuenca del Ebro.

R I O	ESTACION	Nº de obser vac.	Y = a + bx			Y = a + blnx			Y = a . e <sup>bx</sup>			Y = a . x <sup>b</sup>		
			r	a	b	r	a	b	r	a	b	r	a	b
EBRO	Miranda	1	-0.105	422.15	-0.07	-0.141	470.03	-13.85	-1.00	413.68	-0.00016	-0.141	465.42	-0.034
EBRO	Castejón	2	-0.534***	790.37	-0.40	-0.678***	1.505.00	-158.57	-0.499***	762.54	-0.001	-0.617***	2.170.85	-0.233
EGA	Andosilla	3	-0.390***	1.237.39	-5.84	-0.646***	1.692.51	-259.25	-0.457***	1.135.84	-0.006	-0.709***	1.749.87	-0.251
ARGA	Peralta	4	-0.498***	1.287.34	-4.12	-0.612***	2.083.66	-286.05	-0.498***	1.192.51	-0.005	-0.559***	2.587.97	-0.286
ARAGON	Caparroso	5	-0.363***	372.90	-0.28	-0.329***	424.08	-19.22	-0.385***	368.14	-0.001	-0.246**	428.16	-0.057
JALON	Huermeda	9	-0.595***	1.303.14	-20.11	-0.581***	1.690.06	-266.44	-0.564***	1.345.96	-0.022	-0.602***	1.948.81	-0.268
EBRO	Zaragoza	11	-0.319***	1.197.20	-0.50	-0.536***	2.558.52	-287.38	-0.481***	1.160.94	-0.001	-0.624***	5.290.63	-0.331
MARTIN	Hijar	14	-0.560***	2.469.96	-374.55	-0.538***	1.992.44	-305.90	-0.630***	2.470.66	-0.192	-0.583***	1.942.50	-0.151
GUADALOPE	Alcañiz	15	-0.261**	966.31	-3.84	-0.591***	1.078.60	-174.60	-0.359***	927.02	-0.005	-0.643***	1.040.87	-0.189
CINCA	Fraga	17	-0.318***	817.74	-0.84	-0.255**	1.031.70	-70.06	-0.272**	778.10	-0.001	-0.224**	1.095.74	-0.111
ARAGON	Jaca	18	-0.118	218.19	-0.35	-0.158*	223.46	-7.28	-0.095	208.78	-0.002	-0.145	214.81	-0.037
VALIRA	Seo de Urgel	22	-0.232*	152.65	-0.43	-0.228*	164.96	-9.64	-0.176	139.78	-0.003	-0.077	140.45	-0.027
SEGRE	Seo de Urgel	23	-0.540***	216.51	-2.25	-0.550***	239.94	-25.50	-0.543***	211.34	-0.013	-0.493***	232.01	-0.127
SEGRE	Lérida	24	-0.601***	603.38	-1.38	-0.664***	1.049.17	-131.18	-0.608***	606.55	-0.003	-0.657***	1.527.01	-0.274
SEGRE	Seros	25	-0.358***	581.90	-0.59	-0.396***	765.19	-56.49	-0.382***	569.58	-0.001	-0.378***	776.12	-0.100
EBRO	Tortosa	27	-0.411***	938.41	-0.25	-0.420***	1.396.44	-98.72	-0.444***	919.52	-0.003	-0.440***	1.612.61	-0.122
EBRO	Mequinenza	29	-0.405***	972.31	-0.42	-0.329**	1.421.64	-106.88	-0.453***	944.28	-0.001	-0.377**	1.690.94	-0.137
IREGUA	Islallana	36	-0.575***	374.47	-11.64	-0.607***	441.55	-87.81	-0.561***	372.37	-0.043	-0.579***	470.72	-0.315
NAJERILLA	Torre Montalvo	38	-0.701***	438.85	-5.82	-0.822***	620.97	-114.64	-0.754***	442.00	-0.018	-0.844***	760.59	-0.348
JILOCA	Calamocha	42	-0.173*	907.83	-13.72	-0.110	886.73	-18.90	-0.167*	899.20	-0.015	-0.100	877.89	-0.020
TIRON	Cuzcurita	50	-0.221*	1.134.95	-10.06	-0.367**	1.152.04	-60.94	-0.214*	1.084.44	-0.010	-0.355**	1.102.29	-0.078
ARBA	Gallur	60	-0.447***	1.887.10	-18.91	-0.719***	3.410.54	-734.88	-0.453***	1.761.81	-0.013	-0.630***	4.244.75	-0.438
IRATI	Liedena	65	-0.151	288.93	-0.13	-0.031	287.40	-1.33	-0.055	274.32	-0.00026	+0.089	249.83	+0.027
ARGA	Echauri	69	-0.440***	772.13	-1.55	-0.650***	1.177.51	-156.52	-0.519***	720.18	-0.003	-0.663***	1.273.87	-0.227
EGA	Estella	71	-0.541***	732.44	-6.44	-0.654***	924.04	-129.53	-0.466***	709.76	-0.011	-0.557***	970.64	-0.213
ZADORRA	Arce	74	-0.385***	541.98	-1.07	-0.383***	589.20	-30.67	-0.386***	537.41	-0.002	-0.326***	584.05	-0.057
JALON	Grisén	87	-0.482***	1.162.51	-15.26	-0.429***	1.134.04	-61.16	-0.462***	1.149.89	-0.015	-0.399***	1.115.67	-0.057
GALLEGO	Zaragoza	89	-0.682***	1.916.14	-23.94	-0.739***	2.267.59	-383.42	-0.732***	1.861.93	-0.020	-0.749***	2.430.34	-0.306
NELA	Trespaderne	92	-0.464***	279.58	-0.81	-0.769***	510.27	-64.89	-0.518***	367.40	-0.003	-0.766***	549.97	-0.204
JACA	Oña	93	-0.431***	923.08	-5.12	-0.596***	979.50	-70.70	-0.431***	916.26	-0.006	-0.569***	976.18	-0.082
SEGRE	Balaguer	96	-0.616***	598.05	-2.17	-0.702***	755.26	-84.10	-0.671***	589.75	-0.005	-0.733***	817.73	-0.179

L O C A L I Z A C I O N		Nº de obser vac.	Y = a + bx			Y = a + blnx			Y = a . e . bx			Y = a . x . b		
R I O	ESTACION		Nº	r	a	b	r	a	b	r	a	b	r	a
NOGUERA R.	La Piñana	97	-.594***	470.06	-2.74	-.632***	575.18	-59.40	-.608***	467.23	-.007	-.618***	595.97	-.142
ARAGON	Yesa	101	+.126	270.35	+.12	+.126	254.05	+6.49	-.134	268.21	+.00042	+.130	752.92	+.024
HUERVA	Mezalocha	105	-.370***	565.04	-20.17	-.663***	508.74	-46.27	-.398***	556.45	-.036	-.688***	503.88	-.080
EBRO	Sástago	112	-.610***	1.435.30	-1.08	-.803***	3.321.62	-418.77	-.659***	1.387.86	-.001	-.809***	7.494.01	-.379
SEGRE	Pons	114	-.601***	345.02	-1.49	-.608***	445.71	-47.24	-.641***	344.99	-.005	-.678***	487.08	-.164
EBRO	Mendavia	120	-.434***	698.12	-.53	-.562***	1.311.05	-144.83	-.456***	688.53	-.001	-.576***	1.877.55	-.238
EBRO	Flix	121	-.352**	933.93	-.21	-.327**	1.344.61	-87.07	-.381***	915.91	-.00027	-.348**	1.525.54	-.109
GALLEGO	Anzánigo	123	+.084	253.18	+.18	+.055	248.53	+3.17	+.089	249.65	+.001	+.055	245.16	+.013
ARGA	Huarte	159	+.187	254.01	+1.33	+.207	251.12	+9.43	+.152	251.54	+.004	+.207	247.77	+.033
EBRO	Palazuelos	161	-.089	305.69	-.06	-.032	308.97	-1.99	-.084	297.70	-.00016	+.012	292.07	+.002
EBRO	Pignatelli	162	-.694***	897.67	-.57	-.823***	1.537.09	-157.93	-.723***	885.25	-.001	-.820***	2.105.77	-.216
BAYAS	Miranda	165	-.390***	569.82	-7.57	-.602***	559.24	-68.92	-.469***	539.15	-.015	-.693***	526.26	-.134
JEREA	Palazuelos	166	-.502***	409.25	-1.31	-.297**	405.17	-7.58	-.535***	408.08	-.004	-.324**	403.74	-.021
NOGUERA P.	Camarasa	169	+.173	231.04	+.36	+.118	224.42	+5.91	+.170	226.93	+.001	+.110	221.58	+.023
MATARRAÑA	Maela	176	-.177	484.43	-1.28	-.286*	462.77	-15.24	-.214*	478.40	-.003	-.307**	458.46	-.029
ARAGON	Sangüesa	205	-.517***	311.07	-.17	-.417***	349.58	-13.51	-.554***	311.09	-.001	-.447***	358.87	-.050
SEGRE	Pla S. Tirs	206	-.444***	220.29	-.77	-.608***	311.92	-38.06	-.470***	211.51	-.004	-.593***	331.28	-.192
SEGRE	Terrens	207	-.670***	611.90	-2.43	-.757***	787.53	-95.83	-.722***	601.14	-.005	-.773***	865.60	-.205
EBRO	Conchas Haro	208	-.382***	519.97	-.44	-.394***	646.05	-40.26	-.404***	515.49	-.001	-.412***	674.60	-.086
GALLEGO	Zuera	209	-.326*	1.897.39	-5.98	-.577**	4.376.90	-869.10	-.449**	1.563.22	-.005	-.759***	9.274.63	-.627
EBRO	Ribarroja	210	-.367***	942.85	-.31	-.359***	1.696.21	-150.51	-.400***	922.42	-.00041	-.392***	2.471.78	-.197
EBRO	Pina	211	-.714***	1.249.89	-.57	-.880***	3.093.55	-373.05	-.808***	1.244.52	-.001	-.911***	9.666.06	-.420
EBRO	Cherta	212	-.383**	941.25	-.22	-.332*	1.419.18	-99.37	-.410**	917.49	-.00028	-.346**	1.644.13	-.122
ALHAMA	Alfaro	214	-.472***	1.381.33	-142.75	-.259*	1.125.00	-60.27	-.557***	1.323.15	-.209	-.389**	862.78	+.112
HUERVA	Zaragoza	216	-.477***	1.149.38	-58.14	-.488***	1.035.25	-139.76	-.502***	1.101.16	-.060	-.506***	978.23	-.143
ARGA	Orobia	217	-.660**	1.308.81	-49.71	-.588*	1.447.15	-277.32	-.712**	1.385.16	-.061	-.628*	1.632.12	-.338

Y = CE (µmbios/cm)  
X = Caudal (m³/s)

gre, ambos con un caudal importante y con concentraciones salinas menores - que la del Ebro en ese tramo.

A partir de los datos de la Figura 5, se ha realizado el balance de masas de agua y sales para los distintos tramos del río Ebro (Figuras 6 y 7). En el mismo se han identificado los aportes y detracciones difusos - no medidos - como saltos verticales en el trazado del perfil. En estas figuras - queda patente el gran incremento de salinidad en el tramo Pignatelli-Zaragoza, no explicado por los aportes del Jalón y Arba. Este incremento supone un aporte de  $11 \text{ Hm}^3$  de agua con un contenido salino de  $7.5 \text{ g/l}$ . En la explicación de este fenómeno no debe olvidarse la proximidad del diapiro salino de Remolinos.

Buscando la congruencia de los datos del Gállego en Anzánigo y Zuera y - la diferencia de calidades de agua entre las acequias Camarera y Urdana, se ha identificado un aporte puntual de agua que supone  $1/24$  del caudal del barranco de Violada, pero con unas concentraciones de  $48 \text{ mmhos/cm/25}^\circ$ , lo que supone a éste un incremento del  $75 \%$  en el contenido en sales, con el agravante de que el  $90 \%$  corresponde a cloruros y sodio.

Estos mismos cálculos, aplicados al Jalón entre Huermeda y Grisén, ponen en evidencia un sumidero de agua de  $86 \text{ Hm}^3$ , con una concentración de  $640 \text{ mg/l}$ . Los regadíos de este tramo y la recarga del acuífero de esa cuenca explican, al menos parcialmente, esta disminución.

Finalmente, los ríos Arba y Gállego, y especialmente este último, requieren un balance específico. Para el Gállego, las detracciones de la red en Ardisa, su concentración por evaporación en el pantano de La Sotona y los aportes que recibe como efluentes de riego de una parte de las anteriormente detraídas para Monegros I, dan una idea de lo complejo de los procesos, que deben ajustarse para localizar individualmente las fuentes y sumideros de sales.

A modo de síntesis de lo dicho hasta aquí, y tratando de globalizar la relación existente entre la salinidad de las aguas y la de los suelos se han estimado, para cada estación, las sales que alcanzan las aguas superficiales por cada  $\text{m}^2$  de su cuenca de recepción y por cada  $\text{mm}$  de precipitación.

El trazado de la isolínea de  $100 \text{ mg m}^{-2} \text{ mm}^{-1}$  (Fig. 8) separa un corredor central (que contiene al Ebro) con un mayor aporte de sales y que incluye prácticamente la totalidad de las áreas de suelos salinos cartografiados y en el que también quedan incluidos la mayor parte de los terrenos yesíferos de la cuenca.

Evidentemente, este trabajo debe entenderse como una primera aproximación a la evaluación del problema planteado, que requiere de una ampliación de conocimientos en dos aspectos fundamentales: una mayor profundización en la identificación de fuentes y sumideros a través de la utilización de modelos hidrosalinos más complejos para el total de la cuenca y una mejor individualización de cada fuente y sumidero a través de estudios específicos.

Concurrentemente, deben emprenderse los estudios económicos necesarios que categoricen los problemas en función de su magnitud, de la localización en la cuenca y de los costos y beneficios que permitan tomar las decisiones apropiadas tendentes no sólo a la corrección de aquellas situaciones producidas por el uso del agua, sino también las asociadas a procesos naturales que provocan los aumentos de la salinidad.

### Clasificación de las aguas superficiales para riego

Una vez descritos los niveles de salinidad de las aguas de la cuenca, co

# BALANCE DE AGUA DEL RIO EBRO

promedio años hidrológicos 1974-75-77

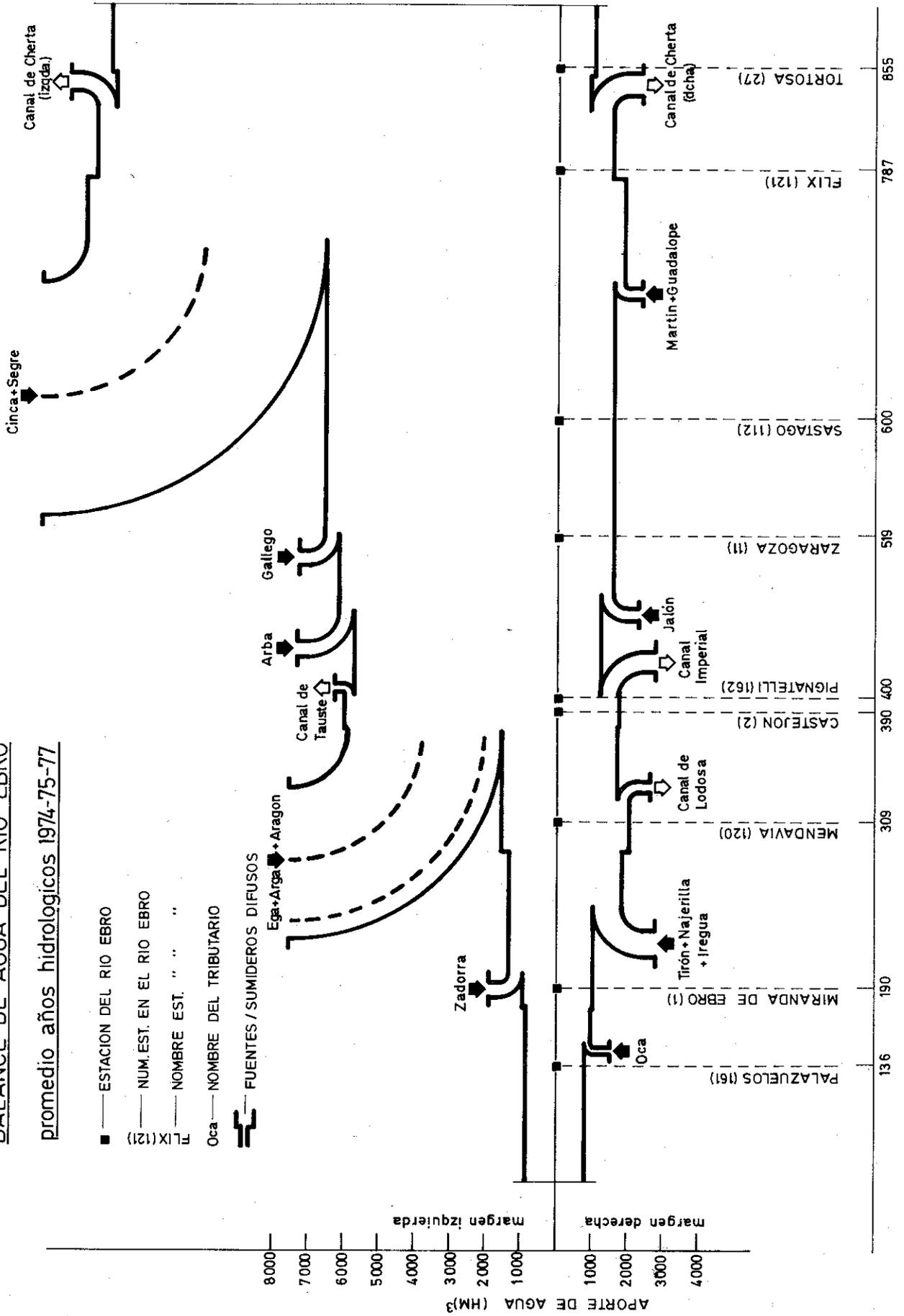


Figura 6. Balance hídrico del río Ebro (años 1974-75-77).

# BALANCE DE SALES DEL RIO EBRO

promedio años hidrológicos 1974-75-77

- ESTACION DEL RIO EBRO
- NUM. EST. EN EL RIO EBRO
- NOMBRE EST. " " "
- Oca NOMBRE DEL TRIBUTARIO
- FUENTES / SUMIDEROS DIFUSOS

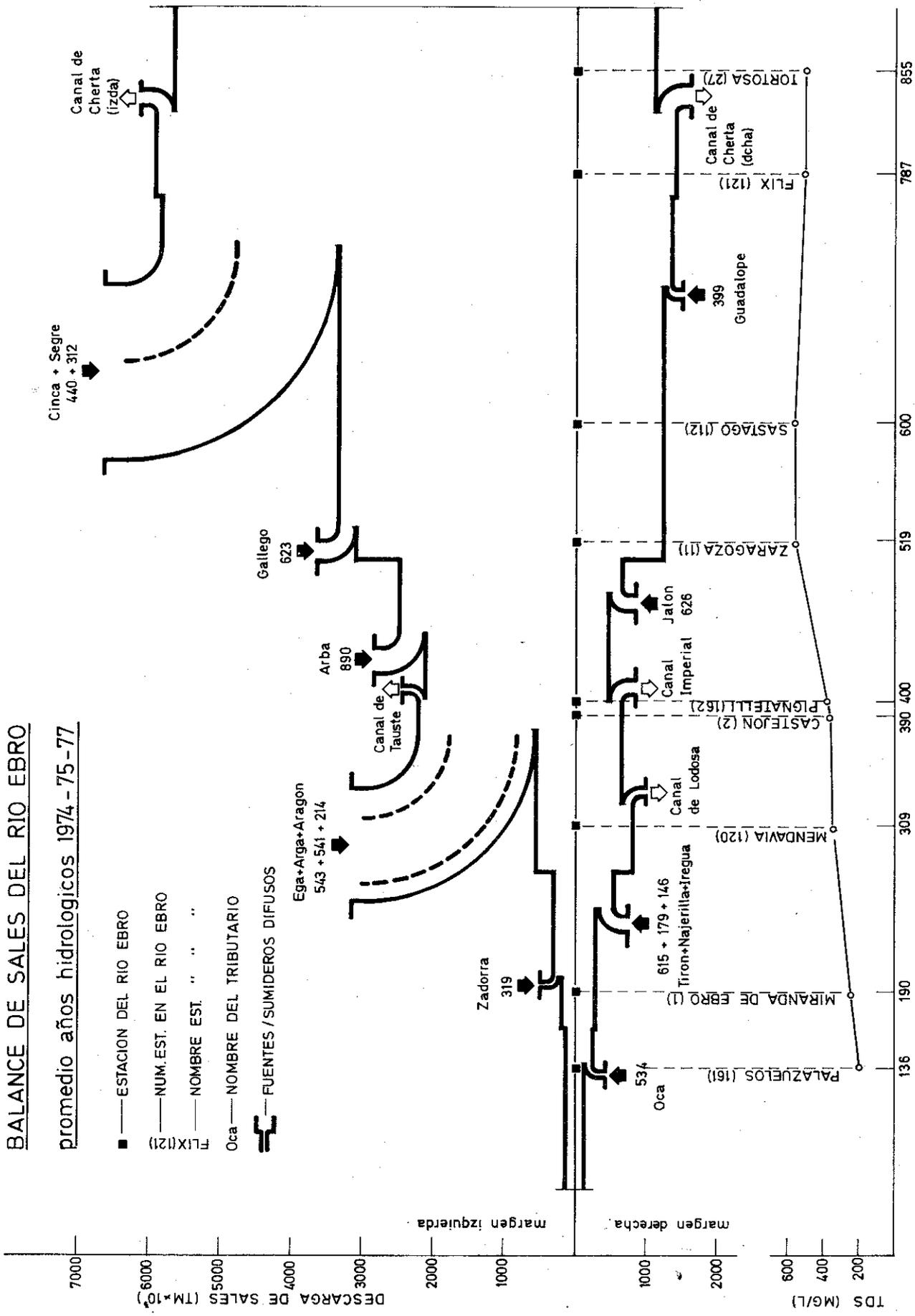


Figura 7. Balance salino del río Ebro (años 1974-75-77).

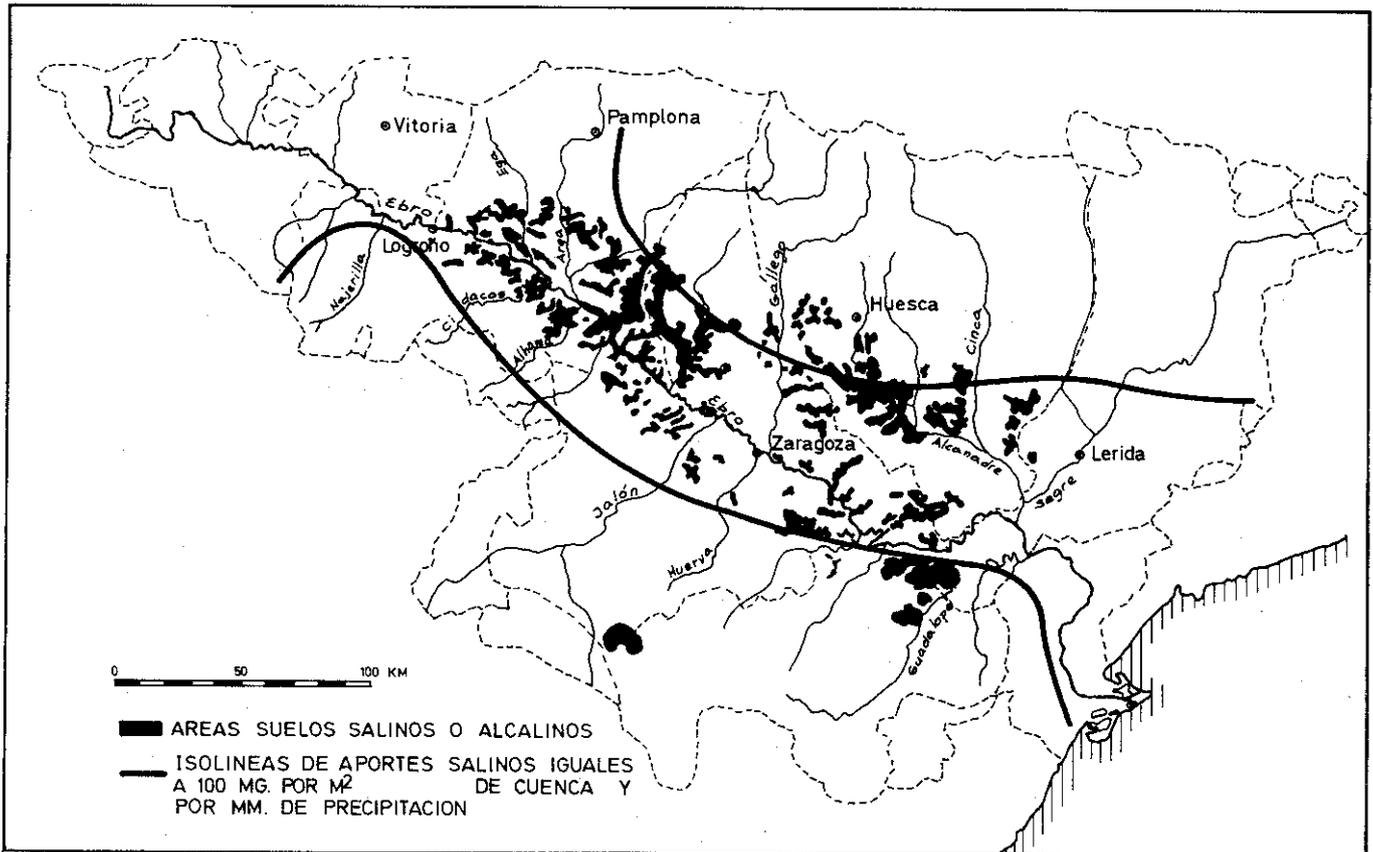


Figura 8. Isolíneas de aportes salinos a la red hidrográfica por m<sup>2</sup> y mm de precipitaciones.

responde efectuar una valoración de la situación actual de la calidad (salinidad) para sus posibles usos. Por nuestra especialización, en este capítulo se presenta una valoración de las aguas para su uso como agua de riego, dejando para otros especialistas aspectos tan interesantes como la valoración de la calidad industrial y de la potabilidad.

La calidad de las aguas para riego viene decidida fundamentalmente por su contenido en sales y su composición iónica.

En las siguientes Tablas 2 a 6 se presenta la valoración global de las aguas de la Cuenca (Alberto et al., 1980), utilizando criterios de clasificación de reciente desarrollo (Aragüés et al., 1979).

TABLA 2

PORCENTAJES DE NIVELES DE RIESGO DE SALINIDAD, SEGUN RICHARDS (1954), PARA AGUAS DE RIEGO DE LA DEPRESION DEL EBRO

INDICE DE SALINIDAD	M. O. P. C. A.		
	Marzo-Abril	Septiembre-Octubre	COFZA
Bajo riesgo de salinidad (C.E. 0,1-0,25) ... ..	9 %	10 %	3 %
Riesgo medio (C.E. entre 0,25 y 0,75) ... ..	61 %	29 %	25 %
Riesgo alto (C.E. entre 0,75 y 2,25) ... ..	29 %	61 %	61 %
Riesgo muy alto (C.E. > 2,25 mmhos/cm/25°) ... ..	1 %	0 %	11 %

**TABLA 3**

**PORCENTAJE DE AGUAS DE RIEGO QUE PUEDEN O NO OCASIONAR PROBLEMAS DE SALINIZACION EN LA DEPRESION DEL EBRO SEGUN LA CLASIFICACION DE AYERS Y WESTCOT (1976)**

	M. O. P. C. A.			
	Marzo-Abril	Agosto	Septiembre-Octubre	COFZA
Aguas sin problemas ... ..	70 %	32 %	39 %	29 %
Aguas con problemas crecientes ... ..	30 %	68 %	61 %	69 %
Aguas con serios problemas ... ..	0 %	0 %	0 %	2 %

El control de ese riesgo de salinización potencial se hace con aportes de agua extras. Las cantidades estimadas como necesarias en función de su salinidad y de las condiciones medias de la región se dan en la Tabla 4:

**TABLA 4**

**CANTIDAD DE AGUA DE RIEGO EN m<sup>3</sup>/ha NECESARIA PARA MANTENER UN NIVEL ADECUADO DE SALES PARA LA PLANTA EN LA ZONA DE RAICES, EN FUNCION DE LA E.T.P. ANUAL Y DE LA C.E. DEL AGUA DE RIEGO**

C.E. del agua de riego mmhos/cm/25°	C U L T I V O		
	Cebada y semejantes	Maíz, patata, etc.	Cítricos y frutales en general
0,75	8.760	9.600	10.340
1,5	9.170	11.200	13.440
2,0	9.460	12.600	16.800

Finalmente, las Tablas 5 y 6 dan los porcentajes de las aguas que quedan clasificadas en cada nivel de toxicidad de acuerdo con su utilización en riego a pie o por aspersión.

**TABLA 5**

**PORCENTAJE DE AGUAS DEL MOPCA EN DIVERSOS NIVELES DE TOXICIDAD POR SODIO Y CLORUROS PARA RIEGO A PIE AL COMIENZO Y FIN DE LA EPOCA DE RIEGO**

EPOCA DE RIEGO	TOXICIDAD POR SODIO			TOXICIDAD POR CLORUROS		
	Sin problemas SAR ajus. < 3	Problemas crecientes SAR ajus. 3 - 9	Problemas serios SAR ajus. > 9	Sin problemas < 4 meq/l < 142 mg/l	Problemas crecientes 4 - 10 meq/l 142 - 355 mg/l	Problemas serios > 10 meq/l > 355 mg/l
Marzo-Abril ... ..	74 %	22 %	4 %	87 %	9 %	4 %
Septiembre-Octubre ... ..	39 %	49 %	12 %	62 %	33 %	5 %

TABLA 6

PORCENTAJES DE AGUAS DEL MOPCA CON DIVERSOS NIVELES DE TOXICIDAD POR SODIO Y CLORUROS PARA APLICACION EN RIEGO POR ASPERSION

EPOCA DE RIEGO	SODIO		CLORUROS	
	Sin problemas < 3,0 meq/l < 69 mg/l	Problemas crecientes > 3,0 meq/l > 69 mg/l	Sin problemas < 3,0 meq/l < 106 mg/l	Problemas crecientes > 3,0 meq/l > 106 mg/l
Marzo-Abril ... ..	77 %	23 %	84 %	16 %
Septiembre-Octubre ... ..	39 %	61 %	46 %	54 %

Curvas de tendencia salinidad-tiempo

La fijación de esta tendencia para toda la red del Ebro exige largas series de datos analíticos y en un número suficiente de estaciones. Las aquí elaboradas ofrecen sólo una visión parcial, dado que comprenden únicamente las estaciones del Ebro en Zaragoza, Miranda y Flix, Aragón en Jaca, Nogueira Pallaresa en La Piñana y Cinca en Fraga, para el período 1960 a 1976 (datos mensuales publicados por Comisaría de Aguas del Ebro). Los datos del Ebro en Escatrón proceden de la Central Térmica y constan de datos diarios de dureza para el período 1960-1975.

Para el primer grupo de estaciones, las curvas de tendencia se han deducido de los valores medios de concentración salina anual obtenidos de los caudales diarios del año central de la serie correlativa de tres años para la que previamente se había establecido la ecuación semilogarítmica entre caudal y CE. Para la estación de Escatrón las concentraciones medias anuales se estimaron para cada año a partir de las curvas anuales de relación entre caudal y dureza.

Las Figuras 9 y 10 dan las ecuaciones de tendencia para cada emplazamiento señalado anteriormente y en la Tabla 7 se dan los factores para transformar los correspondientes valores de CE (micromhos/cm/25°C) y dureza (°F) a TDS (mg/l) y resume el incremento medio anual de TDS (en mg/l) para el período considerado.

Estos valores, considerados en conjunto, parecen consistentes entre sí, siendo los de más fiabilidad los de Escatrón, por su mayor densidad de muestreo (valores diarios frente a mensuales en las otras estaciones).

Comparados estos valores con otros ríos del mundo, estos incrementos son un tanto elevados. Meybeck (1976 y 1979) indica que para los ríos Mississippi, San Lorenzo y Rin los incrementos desde comienzos de siglo han supuesto entre 1 y 3 mg/l por año. Para el lago Ontario estos incrementos supusieron entre 140 y 190 mg/l durante el período 1900 a 1960.

El dato medio anual adquiere su verdadera dimensión cuando establecemos la curva de tendencia para Escatrón para el primer (enero, febrero y marzo) y tercer trimestre (julio, agosto y septiembre) de cada año (este análisis por trimestres sólo es posible efectuarlo en Escatrón por su mayor densidad de datos). Así, de la Figura 10 puede deducirse una mayor tendencia a la salinización en verano, que es precisamente la época de mayor consumo de agua (especialmente por las necesidades de riego).

Por otro lado, la considerable masa de sales que estos incrementos suponen para unas estaciones y simultáneamente la falta de tendencia en otras (por ejemplo, Miranda de Ebro) nos llevó a profundizar en este aspecto del

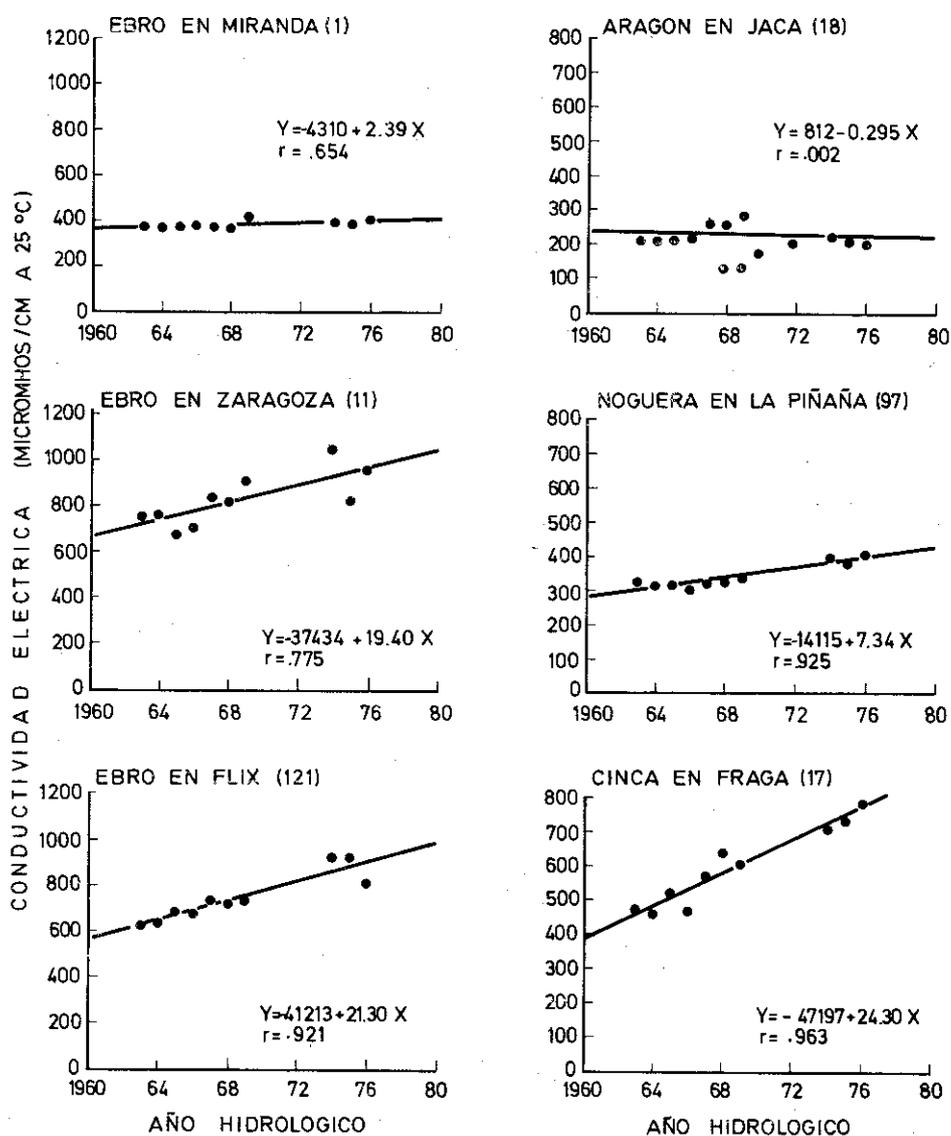


Figura 9. Curvas de tendencia salinidad-tiempo para distintas estaciones de la red del Ebro.

TABLA 7

Incremento anual del TDS para diversas estaciones del Ebro y afluentes. Factores de transformación específicos a TDS (mg/l) de los parámetros considerados en el ajuste de ecuaciones.

ESTACION	Factor de transformación		Incremento anual TDS (mg/l)
	CE-TDS	Dureza °F-TDS	
Ebro en Miranda	0.753	-	1.8
Ebro en Zaragoza	0.759	-	14.7
Ebro en Escatrón	-	22.31	10.4
Ebro en Flix	0.756	-	16.1
Cinca en Fraga	0.714	-	17.4
Aragón en Jaca	0.744	-	0
Noguera R. La Piñana	0.760	-	5.6

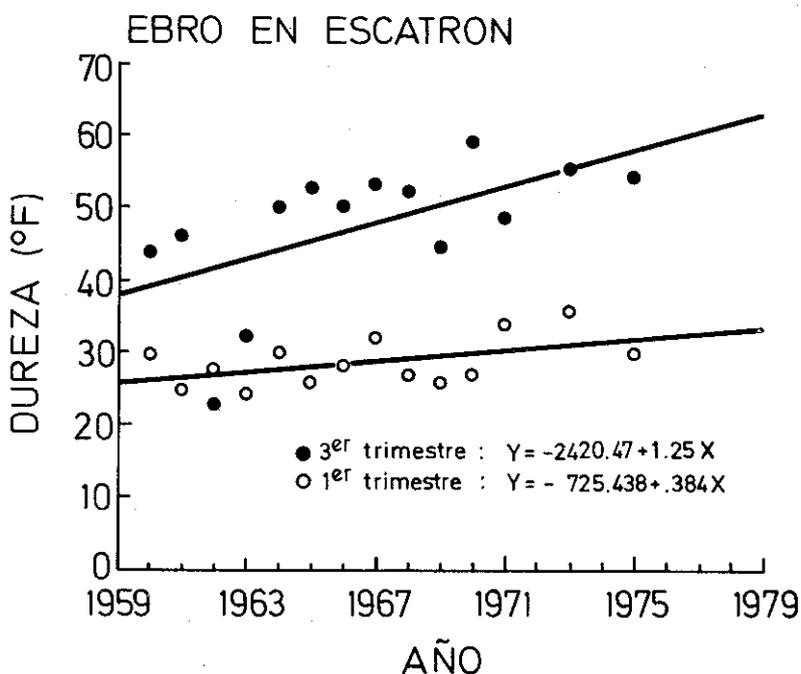
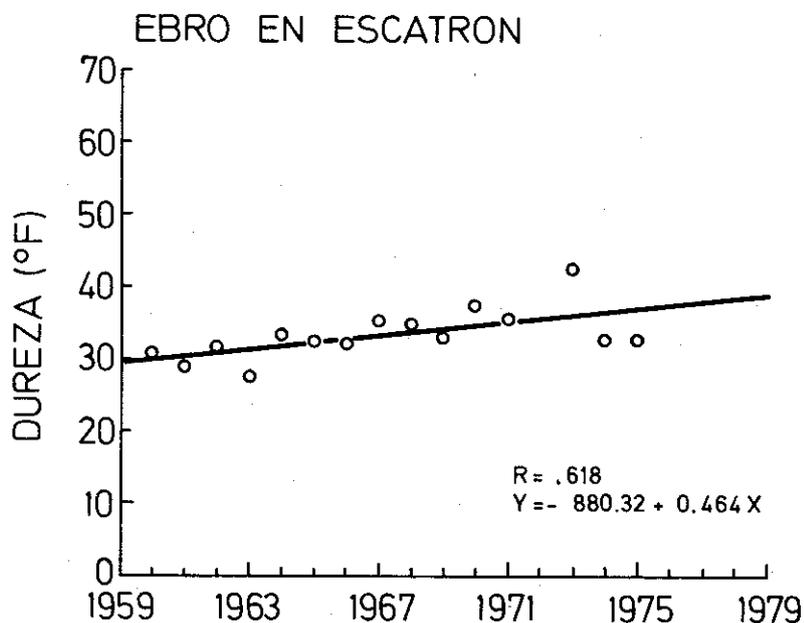


Figura 10. Curvas de tendencia de dureza-tiempo para el año hidrológico y para los trimestres 1° (Enero, Febrero, Marzo) y 3° (Julio, Agosto, Septiembre).

trabajo.

Representando los incrementos de aporte salino durante el total del período 1960-1970 frente a las superficies puestas en regadío en cada una de las cuencas se obtiene la Fig. 11, que demuestra la existencia de una relación entre ambos parámetros. No debe descartarse, sin embargo, que otros procesos concurrentes, tales como el desarrollo industrial, los movimientos demográficos, etc., hayan coadyuvado a estos incrementos en los aportes salinos, aun cuando el regadío es, probablemente, la razón principal de los mismos.

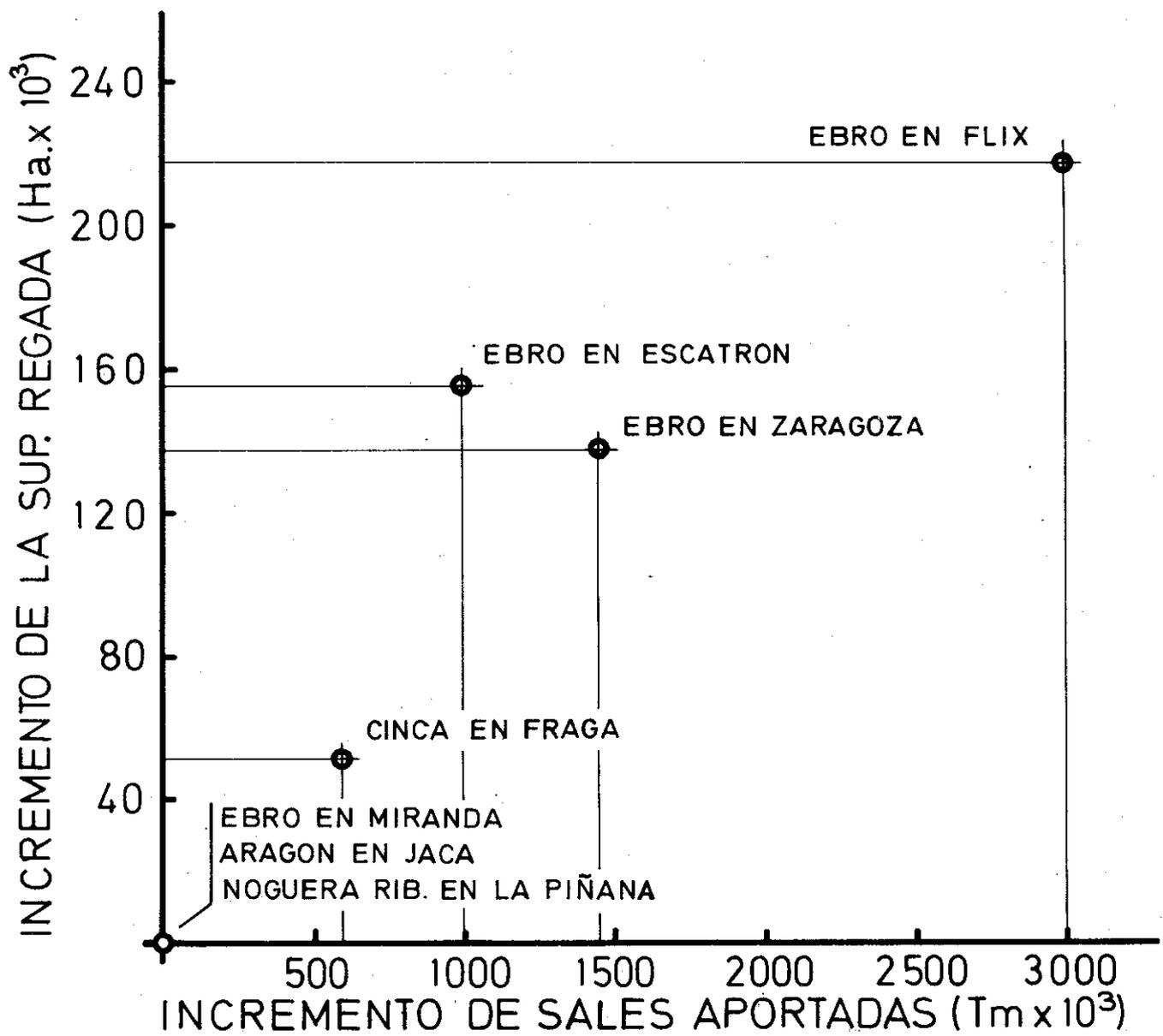


Figura 11. Relación entre incremento en la salinidad y superficies puestas en regadío.

## II. CONTROL DE LA SALINIZACION DE LAS AGUAS

En la primera parte de esta ponencia se han discutido las razones principales de la salinización de las aguas y su variabilidad espacio-temporal, con especial referencia a las de la Cuenca del Ebro.

La conclusión fundamental de lo allí expuesto es que esta salinización progresiva de las aguas, común a otras cuencas de las regiones áridas o semiáridas de la Tierra, es un proceso vinculado ineludiblemente a su uso consuntivo, y un componente importante de la contaminación general de las mismas.

Dentro de nuestro trabajo específico de investigación, en esta segunda parte de la ponencia se discuten las alternativas a adoptar en la agricultura de regadío (y, especialmente, en el subsistema finca de un polígono de riego, Figura 12) tendentes a minimizar la salinización de las aguas de retorno del subsistema desagüe al río.

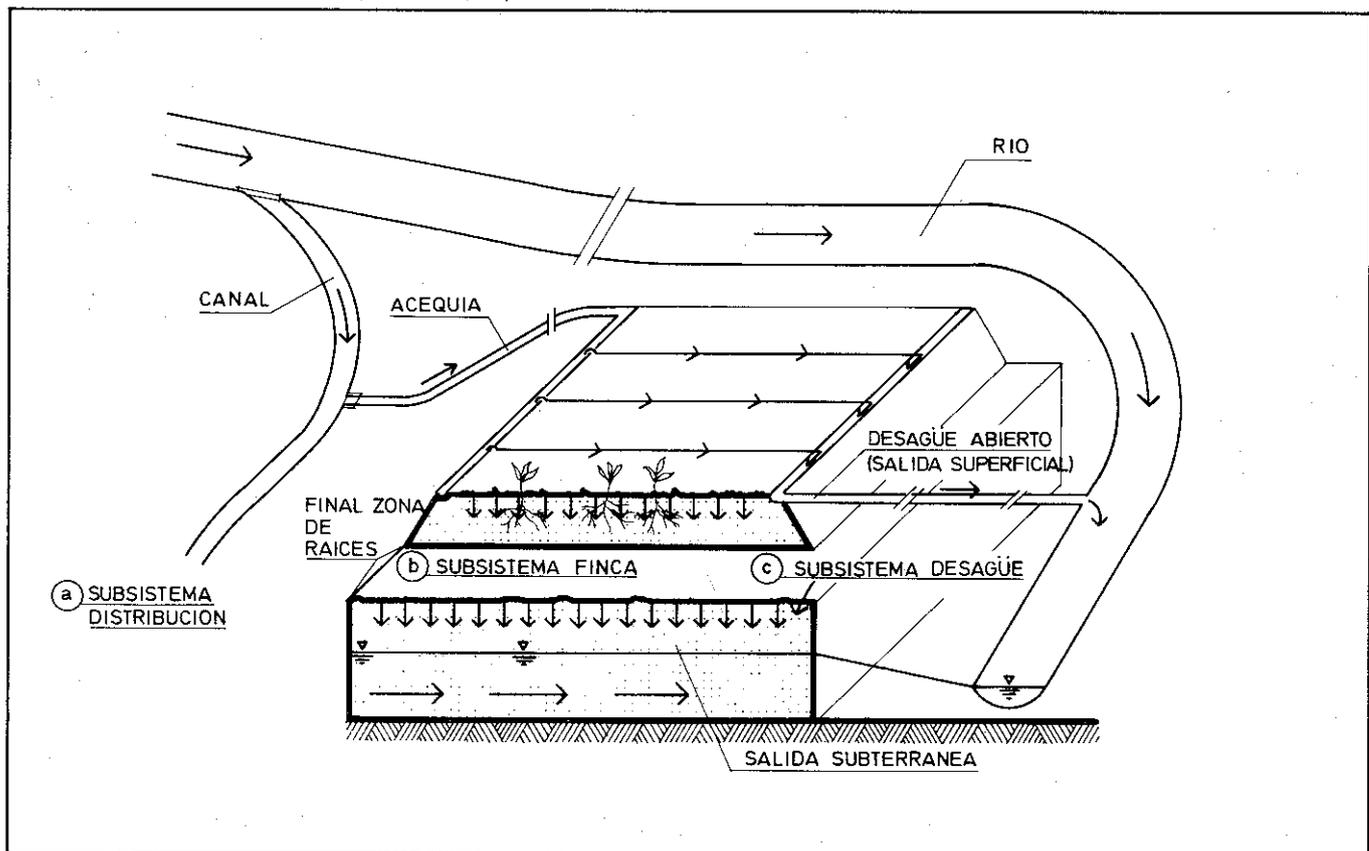


Figura 12. Esquema idealizado de un polígono de riego.

Obviamente, el esquema representado en la Figura 12 no es más que una simplificación idealizada de la complejidad inherente a todo sistema biofísico.

Una generalización conceptual del sistema hidrológico en consideración conduce a diagramas como el de la Figura 13 (Hyatt et al., 1970), en el que se presentan los flujos hidrosalinos a partir de los cuales pueden establecerse distintos modelos de simulación para la cuantificación del sistema.

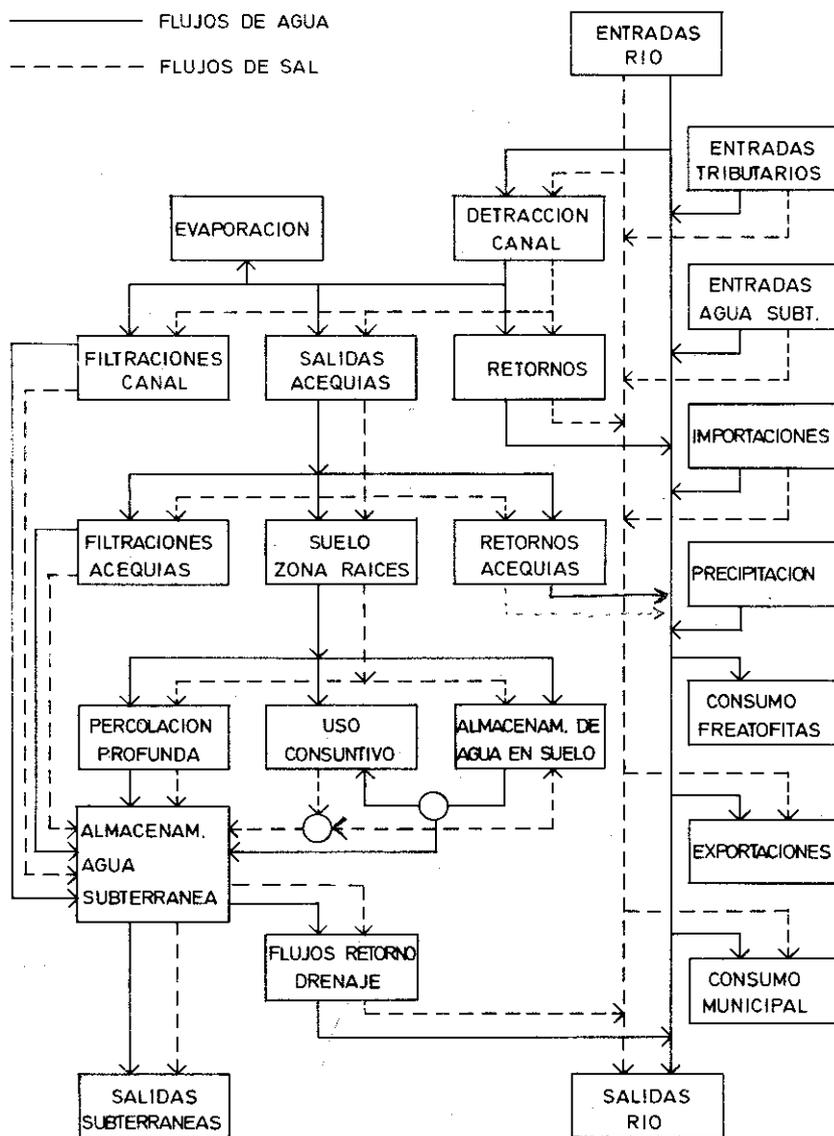


Figura 13. Diagrama de flujos de agua y sales de un sistema hidrológico incluyendo polígono de riego.

tema o subsistemas de interés (Tanji, 1981).

En nuestro caso, se ha elegido el modelo conceptual hidrosalino de Tanji (1977) por su simplicidad relativa - que lo hace operativamente viable al nivel de conocimientos existente en la Cuenca del Ebro - y, fundamentalmente, por su capacidad para evaluar el peso relativo de las diferentes variables que afectan a la masa de sales de las aguas de retorno, objetivo principal de nuestra investigación.

Básicamente, el modelo conceptual hidrosalino - revisado y adaptado a las condiciones prevalentes en la Cuenca del Ebro - consta de un submodelo de agua y un submodelo de sales en los que se simulan los flujos principales dentro de un polígono de riego (Figura 14). Así, las entradas de agua son el riego, la precipitación y los posibles aportes laterales de áreas contiguas, y las salidas son la evapotranspiración, la percolación profunda y las aguas de retorno. A su vez estas últimas están formadas por los aportes de la escorrentía del riego, de la precipitación y del drenaje superficial. Paralelamente, hay unos flujos de sal asociados a los de agua y se

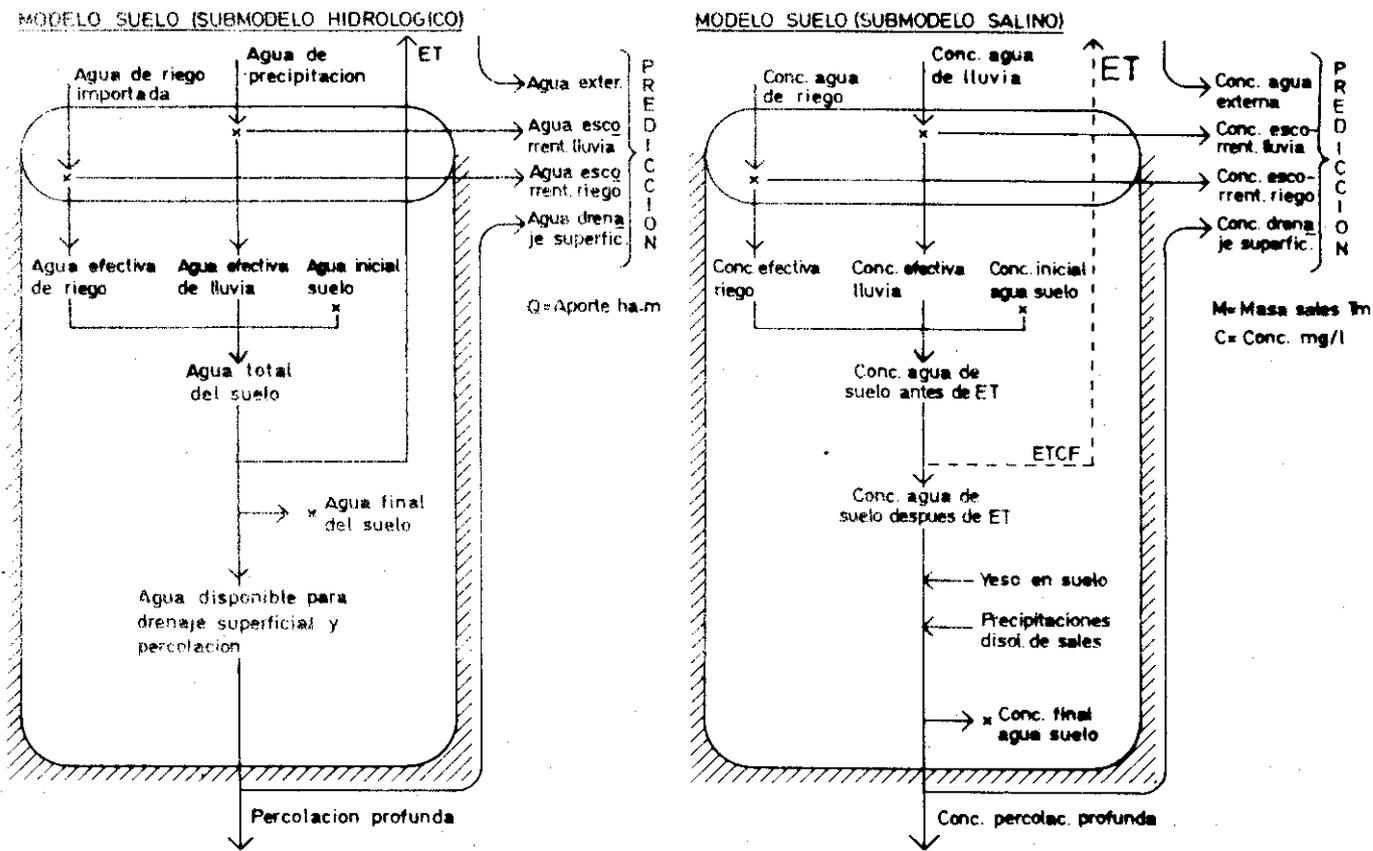


Figura 14. Modelo conceptual hidrosalino de un polígono de riego.

considera además la posibilidad de la presencia de yeso o sales más solubles, y la disolución-precipitación de sales por efecto del agua de riego.

Este modelo se ha calibrado en un polígono piloto de unas 4.000 ha de regadío del primer tramo del canal de Monegros (Figura 15) que es representativo de una parte importante de los regadíos de Aragón, tanto por su contenido en yeso como por sus características climatológicas y de suelo. Para ello, durante el año hidrológico 1981-82 se han realizado los trabajos experimentales necesarios de control y medida de las entradas y salidas de agua y sal del polígono.

Como se deduce de la Tabla 8, los resultados de la calibración coinciden sustancialmente con los valores medidos en las aguas de retorno superficial. Las diferencias observadas pueden atribuirse a aportes laterales de agua, a las filtraciones de canales (que no se han considerado en dicha calibración) y a la variabilidad espacial del suelo.

A través de este modelo calibrado, se ha efectuado la estimación de la cantidad de agua y sales de retorno bajo tres situaciones diferentes que pueden atravesar éste y muchos otros polígonos de riego de Aragón: (1) una situación inicial con presencia abundante de sales ( $CE_e^{(1)} = 6 \text{ mmhos/cm}$ ) y yeso en el perfil del suelo, (2) la situación actual, con presencia de yeso

(1)  $CE_e$  = conductividad eléctrica del extracto saturado.

POLIGONO PILOTO DE LA VIOLADA (I TRAMO CANAL MONEGROS). ACEQUIAS Y DESAGÜES

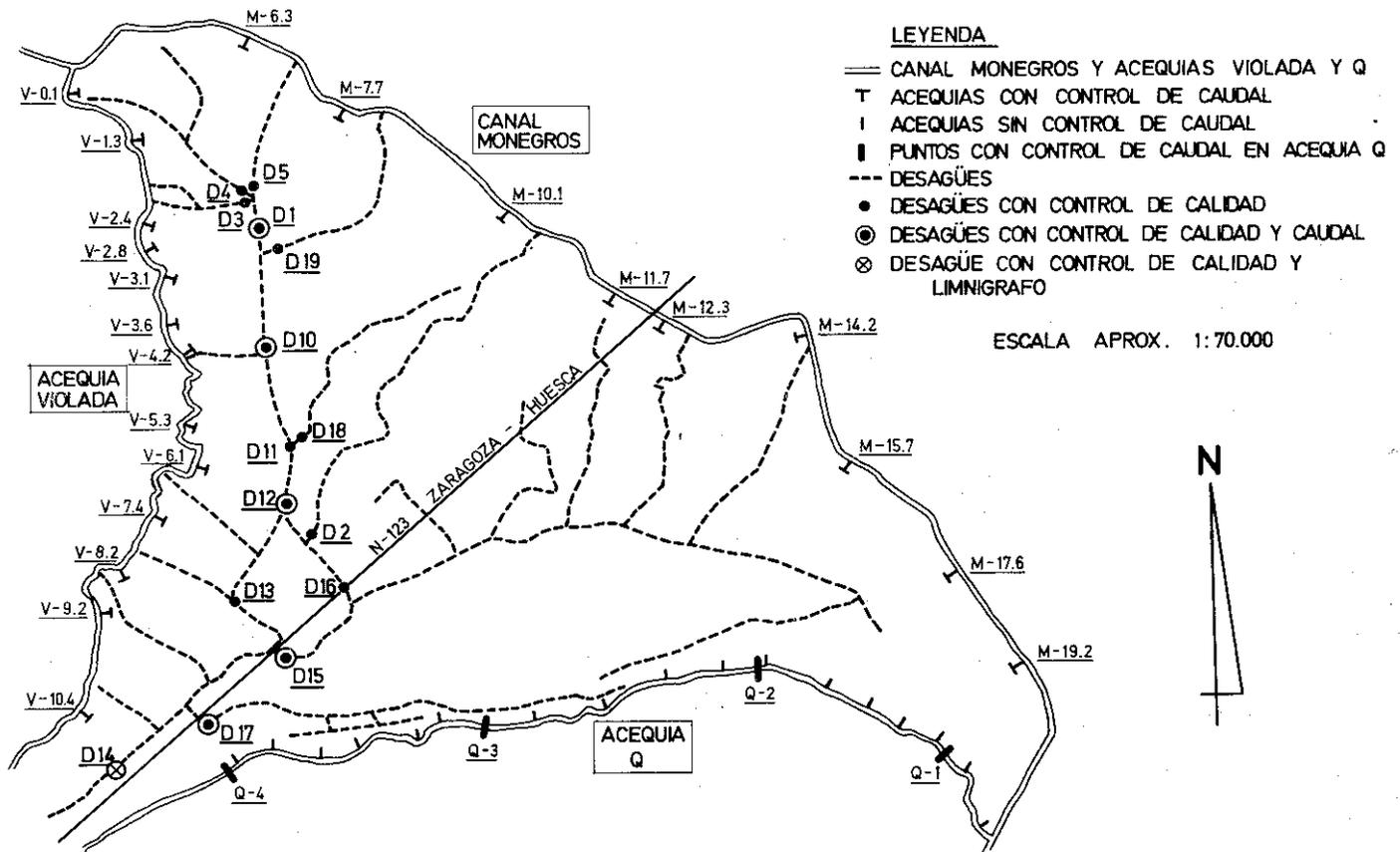


Figura 15. Polígono de riego de La Violada.

y pocas sales solubles ( $CE_e = 2.73$  mmhos/cm) y (3) una situación hipotética final en la que no hay ni yeso ni sales ( $CE_e = 0$ ), por haber sido ya lavados por el agua de riego y de lluvia. (En este último caso cabe resaltar que el tiempo medio requerido para disolver el yeso de la zona de raíces del polígono puede estimarse, de acuerdo con los resultados del modelo calibrado, en unos 30 años).

Para cada una de estas tres situaciones, se evalúa el efecto de las variables "agua de riego aplicada", "evapotranspiración" y "concentración (TDS, mg/l) del agua de riego" sobre el volumen (Q), masa de sales (M) y concentración de las aguas de retorno (TDS). Los resultados de esta simulación se presentan en la Tabla 9.

Evidentemente, la presencia de sales solubles en el perfil del suelo (columna 1 frente a columna 2) es el factor fundamental que gobierna la masa y concentración de sales en las aguas de retorno, independientemente de los valores del resto de las variables.

Por otro lado, en el caso de la presencia única de yeso en el perfil (columna 2) se observa que la concentración de las aguas de retorno prácticamente depende sólo de esta variable, esto es, sus valores son muy constantes y en el rango de una solución saturada en yeso, (2630 mg/l en agua pura). Por lo tanto, la masa de sales en estas aguas de retorno es función única del volumen de agua percolada, por lo que la optimización del riego (entendida como la aplicación del agua exclusivamente requerida por la planta) y la reutilización de las aguas son acciones de gran eficacia para el

TABLA 8. Calibración del Modelo Conceptual Hidrosalino. Polígono Piloto de La Violada (I Tramo del Canal de Monegros). Año Hidrológico 1981-82

<u>ENTRADAS AL MODELO</u>	
Superficie (ha) . . . . .	3.913
Agua de riego aplicada (ha-m) . . . . .	3.881
Eficiencia de aplicación del riego . . . . .	0.94
Precipitación (ha-m) . . . . .	1.809
Coefficiente de escorrentía de la precipitación . . . . .	0.013
Coefficiente de evapotranspiración de la precipitación . . . . .	0.03
Coefficiente de precipitación efectiva . . . . .	0.957
Agua inicial del suelo (ha-m) . . . . .	760
Agua final del suelo (ha-m) . . . . .	760
Capacidad de retención de agua del suelo (m/m) . . . . .	0.37
Profundidad media de raíces (m) . . . . .	0.75
Evapotranspiración (ha-m) . . . . .	2.822
Evapotranspiración potencial (ha-m/ha) . . . . .	4.575
Coefficiente de evapotranspiración . . . . .	0.617
Coefficiente de percolación profunda . . . . .	0.05
Entradas de aguas laterales (ha-m) . . . . .	0
(1) TDS aguas laterales (mg/l) . . . . .	0
TDS agua de riego aplicada (mg/l) . . . . .	190
Sales disueltas por agua de escorrentía de riego (mg/l) . . . . .	20
TDS precipitación (mg/l) . . . . .	51
Sales disueltas por agua de escorrentía de lluvia (mg/l) . . . . .	20
(Disolución-precipitación) sales agua riego (Tm) . . . . .	-195
(2) CE extracto saturado del suelo (mmhos/cm a 25°C) . . . . .	2.73
Porcentaje de saturación (g. agua/g. suelo) . . . . .	0.47
Yeso en la zona de raíces del suelo (Tm) . . . . .	2.320.000

	<u>Valores estimados</u>	<u>Valores medidos</u>
Volumen aguas de retorno (ha-m) . . . . .	2686	3164
TDS aguas de retorno (mg/l) . . . . .	2798	2273
Masa de sales en las aguas de retorno (Tm). . . . .	75121 <sup>b</sup>	71910

(1) TDS: sólidos disueltos totales; (2) CE: conductividad eléctrica.

TABLA 9. Simulación, a través del Modelo Conceptual Hidrosalino, del Volumen de Agua (Q), Masa de Sales (M) y Concentración (TDS) de las Aguas de Retorno de un Polígono de Riego para diferentes Situaciones Hipotéticas.

Variable	(1) Situación inicial (yeso y abundantes sales solubles)			(2) Situación actual (yeso y pocas sales solubles)			(3) Situación final (sin yeso y sin sales solubles)		
	Qx10 <sup>3</sup> ha-m	Mx10 <sup>3</sup> Tm	TDS mg/l	Qx10 <sup>3</sup> ha-m	Mx10 <sup>3</sup> Tm	TDS mg/l	Qx10 <sup>3</sup> ha-m	Mx10 <sup>3</sup> Tm	TDS mg/l
<u>Agua riego aplicada</u>									
5000 ha-m	3.75	137.9	3674	3.75	103.9	2768	3.75	8.2	218
3000 ha-m	1.85	80.8	4376	1.85	52.2	2828	1.85	4.4	238
2000 ha-m	0.89	46.4	5195	0.89	25.5	2849	0.89	2.3	260
<u>Evapotranspiración</u>									
3500 ha-m	2.04	86.7	4244	2.04	57.4	2810	2.04	5.7	277
2500 ha-m	3.00	116.0	3877	3.00	83.5	2789	3.00	6.2	208
1500 ha-m	3.94	143.5	3639	3.94	109.1	2767	3.94	6.6	166
<u>TDS agua riego</u>									
100 mg/l	2.69	104.2	3880	2.69	72.5	2700	2.69	3.5	129
300 mg/l	2.69	110.0	4097	2.69	78.3	2916	2.69	9.3	346
500 mg/l	2.69	115.8	4312	2.69	84.1	3132	2.69	15.1	562

control de la salinización.

En el caso de presencia abundante de sales en el perfil (columna 1) la reducción de la fracción de lavado y la reutilización de las aguas para el riego como técnicas para minimizar la masa de sales exportadas deben realizarse sin embargo con precaución, puesto que el aumento de la concentración es tan importante (unos 1500 mg/l en la simulación efectuada) que puede afectar seriamente al rendimiento de los cultivos. Por el contrario, si las aguas retornan directamente al cauce principal (esto es, no se reutilizan para el riego), la disminución de la fracción de lavado es todavía recomendable, ya que en este caso el factor fundamental es la masa (y no la concentración) de sales que, como se ve, disminuye desde  $137.9 \times 10^3$  Tm (para 5000 ha-m de agua de riego aplicada) hasta  $46.4 \times 10^3$  Tm (para 2000 ha-m de agua de riego aplicada). En este sentido deben resaltarse los peligros, no reconocidos habitualmente, del exceso de riego, tan habitual entre los agricultores.

La evapotranspiración (ET) es otra variable que afecta a la cantidad y calidad de las aguas de retorno. Dado que la ET es la que controla el factor de concentración del agua en el suelo, es recomendable minimizar la misma - sobre todo en el caso de presencia de sales en el perfil -, con el fin de no afectar a los cultivos implantados. Evidentemente, esta minimización debe realizarse únicamente sobre la componente evaporación (para el período de no cultivo, o a través de prácticas culturales como el mulching, no laboreo...) o a través de la eliminación de malas hierbas, ya que la transpiración es necesaria para el crecimiento vegetativo.

Desde el punto de vista de las aguas de retorno, de la Tabla 9 se deduce que esta minimización de la ET puede conducir sin embargo a incrementos importantes de la masa de sales exportadas, si no va acompañada de una reducción en el agua de riego aplicada. En este sentido deben resaltarse los efectos negativos de los turnos fijos de riego que conducen a un incremento del volumen de las aguas de retorno en los períodos de baja ET. Por ello debe favorecerse el riego a la demanda, por su mayor eficiencia en el uso del agua.

Finalmente, de la Tabla 9 puede deducirse que el efecto de la concentración del agua de riego es muy importante en el caso de ausencia de sales en el perfil (columna 3 - aumento de más de cuatro veces en el TDS de las aguas de retorno al aumentar el TDS del agua de riego de 100 a 500 mg/l -), pero de menor significación relativa cuando hay sales en el suelo. En este sentido puede añadirse que estos valores de 500 mg/l son los habituales en las aguas de drenaje de los suelos de las terrazas de los ríos de la Cuenca.

Otro factor que afecta a la salinidad de las aguas de retorno es la composición iónica del agua de riego, ya que la misma, al concentrarse en el suelo, puede precipitar parte de sus sales disueltas (disminuyendo por lo tanto la masa de sales de las aguas de retorno) o disolver el carbonato cálcico generalmente presente en los suelos (aumentando consecuentemente la masa de sales).

TABLA 10. (Precipitación-disolución) agua de riego en función de la fracción de lavado y de la presión parcial de CO<sub>2</sub>.

Fracción de lavado	(Precipitación-Disolución) sales, gramos	
	P CO <sub>2</sub> = 10x10 <sup>-4</sup> atm	P CO <sub>2</sub> = 3.5 x 10 <sup>-4</sup> atm
0.2	6.75 x 10 <sup>-2</sup> g.	7.72 x 10 <sup>-2</sup> g.
0.3	5.06 x 10 <sup>-2</sup> g.	6.51 x 10 <sup>-2</sup> g.
0.4	3.37 x 10 <sup>-2</sup> g.	5.30 x 10 <sup>-2</sup> g.
0.5	1.67 x 10 <sup>-2</sup> g.	4.10 x 10 <sup>-2</sup> g.
1.0	-6.80 x 10 <sup>-2</sup> g.	-2.10 x 10 <sup>-2</sup> g.

En la Tabla 10 se ha efectuado una simulación de esta precipitación-disolución con el agua de riego que abastece al polígono de calibración. Puede observarse que la fracción de lavado LF (definida como la fracción del agua aplicada que percola por debajo de la zona de raíces) y la presión parcial de CO<sub>2</sub> (que depende fundamentalmente de la temperatura y actividad biológica del suelo) afectan de manera muy significativa a esta variable, de tal manera que conforme aumenta la LF, la (precipitación-disolución) disminuye hasta hacerse negativa (esto es, hay disolución de sales) para una LF hipotética de 1.0. Este concepto ha sido utilizado por algunos (U.S. Salinity Laboratory 1976-81) para postular la noción de "fracción de lavado mínima", esto es, la reducción de la fracción de lavado a un mínimo para provocar la precipitación, fuera de la zona de raíces, de las sales menos solubles (carbonato cálcico y yeso, fundamentalmente) y minimizar la meteorización. Aunque conceptualmente esta noción es sugestiva, no está exenta de riesgos derivados del aumento de la concentración de la solución del suelo.

Evidentemente, las alternativas propuestas hasta aquí para el control de la salinidad a nivel finca o parcela deben realizarse en conjunción con otras más generales. La Tabla 11 presenta, a modo de sinopsis, algunos tipos de acciones y objetivos perseguidos en relación con el tema que nos ocupa. De todas ellas, queremos resaltar la necesidad de la investigación tendente a la adquisición de los conocimientos necesarios para la resolución, o minimización, del problema planteado.

Por otro lado, puede observarse que algunos de los objetivos propuestos requieren de un esfuerzo conjuntado de diferentes organismos de la administración, por lo que la coordinación global entre ellos a nivel Cuenca es un requisito fundamental.

Para finalizar, queremos significar que el trabajo desarrollado en esta ponencia está íntimamente ligado a nuestra firme convicción de que la promoción socio-económica de la Cuenca del Ebro se fundamenta en gran parte en el desarrollo de una agricultura basada en el regadío, de cuyos beneficios nadie puede dudar (Tabla 12). Los problemas referentes a la salinidad derivados de esta agricultura de regadío, y que hemos pretendido exponer en parte en esta ponencia, tienen solución, por lo que nuestra responsabilidad estriba en aplicar los conocimientos y la tecnología que conduzcan a la instauración de una agricultura próspera y duradera.

TABLA 11. Acciones y objetivos tendentes a minimizar la salinización de las aguas.

	A C C I O N	O B J E T I V O S
1	Instalación de medidores de caudal	- medir el agua de riego aplicada - penalizar al despilfarrador
2	Revestir canales y/o instalar tuberías.	- eliminar filtraciones - eliminar ET freatofitas - eliminar la evaporación (tuberías)
3	Optimizar el riego (diseño de la red de acequias; calendario de riegos; nivelación; métodos de aplicación; control de la ET; fertilizantes; prácticas culturales).	- distribuir el agua uniformemente - minimizar los flujos de retorno y las pérdidas por percolación profunda - aplicar el agua en el momento oportuno y en la cantidad adecuada - promover la precipitación de sales y/o minimizar la meteorización
4	Optimizar el desague (diseño de la red de desagües; instalación de drenes (capas freáticas); bombeo de pozos (acuíferos artesianos)).	- mantener un balance de sales adecuado - controlar la capa freática - desplazar las sales de la zona de raíces - evitar encharcamientos, falta de aireación, salinidad, sodicidad...
5	Optimizar la gestión del agua (flexibilizar y tecnificar la red de distribución; involucrar al regante; potenciar organismos de gestión y control a nivel Cuenca; crear servicios de asesoramiento; ley de aguas).	- regar a la demanda - incrementar la eficiencia en la distribución - responsabilizar al regante
6	Acciones preventivas (minimizar la construcción de embalses en zonas de elevada ET, repoblar las zonas húmedas o de recarga, etc.)	- evitar la evaporación del agua - controlar el ciclo hidrológico
7	Acciones puntuales (construcción de canales de evacuación al mar u otros lugares apropiados; construcción de embalses de evaporación; inyecciones profundas de aguas saladas; desalinización.	- evacuar las aguas salinizadas - minimizar los flujos de retorno - eliminar las sales del agua
8	Investigación.	- adquisición de conocimientos

TABLA 12. Beneficios derivados del regadío.

---

BENEFICIOS DERIVADOS DEL RIEGO

1. Aumento absoluto de la superficie cultivada, especialmente en zonas áridas o semiáridas.
  2. Aumento de la producción por unidad de superficie, incrementando los ingresos por ha. cultivada.
  3. Obtención de más de una cosecha por año.
  4. Elección flexible del cultivo y posibilidad de plantar variedades más productivas.
  5. Seguridad para el agricultor, que se inclina a invertir más en fertilizantes, pesticidas y maquinaria agrícola, que incrementan la productividad final agrícola.
  6. Mejoras socio-económicas a nivel local y nacional: aumento de la renta per capita, disminución de la emigración, establecimiento de industrias agro-alimentarias, autoabastecimiento y exportación de alimentos, etc.
- 

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Alberto, F., Aragüés, R., Machín, J., Cuchi, J.A. (1980). Calidad de agua para el riego. II: Aplicación a aguas de la Depresión del Ebro. I.T.E.A. 38 (55-71).
- Ambroggi, R.P. (1980). Water. Scientific Am., September: 91-104.
- Aragüés, R., Alberto, F., Cuchi, J.A., Machín, J. (1979). Calidad del agua para el riego. I: Criterios generales. I.T.E.A. 37 (3-17).
- Hyatt, M.L., Riley, J.P., McKee, M.L., Israelson, E.K. (1970). Computer simulation of the hydrologic-salinity flow system within the upper Colorado River basin. PRWG 54-1. Utah Water Res. Lab. Utah State Univ., Logan, 124 p.
- Meybeck, M. (1976). Total mineral dissolved transport by world major rivers. Hydrol. Sci. Bull. 21 (2): 265-284.
- Meybeck, M. (1979). Concentrations des eaux fluviales en éléments majeurs et apports en solution aux océans. Revue de Géol. Dyn. et de Géog. Phys. 21 (3): 215-246.
- Pillsbury, A.F. (1981). The salinity of rivers. Scientific Am., July: 32-43.
- Tanji, K.K. (1977). A conceptual hydrosalinity model for predicting salt

load in irrigation return flows. En: Dregne, H.E. (Ed.), Managing saline water for irrigation. Texas Tech. Univ. Lubbock. 49-65.

Tanji, K.K. (1981). River basin hydrosalinity modeling. En: Land and stream salinity. Holmes y Talsma Ed. Elsevier Co., Amsterdam: 207-225.

U.S.D.I. (1981). Quality of water Colorado river basin. Progress report No. 10. 190 p.

U.S. Salinity Laboratory. Annual reports 1976-81. Riverside (USA).

### Agradecimientos

Parte del trabajo presentado en esta ponencia ha sido realizado en el proyecto de investigación "Calidad de las aguas continentales y marítimas. Delta del Ebro", financiado por el Comité Conjunto Hispano-Norteamericano para la cooperación científica y tecnológica.

Deseamos agradecer la inestimable colaboración recibida en los trabajos expuestos por parte de la Comisaría de Aguas del Ebro, IRYDA, Confederación Hidrográfica del Ebro y Ayuntamiento de Zaragoza.

En diferentes partes de este trabajo han participado, además de los firmantes, Ken Tanji, José María Faci, Dolores Quílez, Javier Machín, José Luis Arrué, María Jesús Ibor, Maribel Poc, María José Salvador, Begoña Díaz del Cuvillo, Jesús Faci y Pedro Soriano.

## I N D I C E

### LA SALINIZACION

#### I - Procesos de salinización de las aguas

- Causas.
- Problemas que plantea.
- La salinización en la Depresión del Ebro.
  - Variabilidad de la salinidad:
    - Ligada a los caudales
    - Estacional
    - Interanual
    - Espacial
  - Balance hidrosalino de la Cuenca.
    - Metodología
    - Identificación de fuentes y sumideros
    - Difusos
    - Puntuales
    - Balance del río Ebro
  - La calidad de las aguas para riego.
    - Salinidad
    - Toxicidad
    - Manejo del agua
  - Tendencia a la salinización con el tiempo.
    - Metodología
    - Estimaciones
    - Variación estacional
    - Relación con el incremento del regadío

#### II - Control de la salinización de las aguas

- La salinización de los efluentes de riego.
- Esquema idealizado de un polígono de riego.
- Diagrama de flujos de agua y sales de un sistema hidrológico incluyendo polígonos de riego.
- Descripción y calibración de un modelo conceptual hidrosalino.
- Estimación de la cantidad de agua y sales de retorno de un polígono de riego.
  - Con yeso y abundantes sales solubles
  - Con yeso y pocas sales solubles
  - Sin yeso y sin sales solubles
  - Relación entre precipitación y disolución de sales y composición del agua de riego, fracción de lavado y presión parcial del CO<sub>2</sub>
- Acciones y objetivos tendentes a minimizar la salinización de las aguas.
- Beneficios derivados del riego.