



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

UNIVERSIDAD DE LERIDA
ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS AGRONOMOS

RELACIONES CLIMA-AGUA-SUELO-SUBSUELO
EN MONEGROS II

Trabajo presentado por

Ana Berga Celma

en satisfacción a los requisitos necesarios
para optar al grado de Doctor

Dirigida por: **Dr. D. Ramón Aragüés Lafarga**

S.I.A. - D.G.A. Zaragoza

Firma del doctorando:

Firma del Director:

A mi familia

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas a quienes debo dar las gracias y que lo saben sin necesidad de ser nombradas. Por eso citaré solamente :

- Al Dr. Ramón Aragües Director de este trabajo.
- Al Dr. Jaime Porta , tutor del programa de Doctorado y ponente ante la Universidad de Lérica.
- A D. Julián Martínez Beltrán por introducirme en la problemática de Monegros.
- A I.R.Y.D.A por la beca concedida para cuatro meses en 1986 y por la financiación de obras relacionadas con este estudio.
- A I.N.I.A. por la beca concedida desde Noviembre de 1986 a Agosto de 1989.
- A Miguel Angel Franco, M^a Carmen Galindo, Maite Aguinaco y Rosa Gómez por su valiosa colaboración en la edición del texto.
- A José Faci por la revisión del capítulo Clima.
- A Juan Herrero por la revisión del capítulo Suelo.
- A Juan Mandado por la revisión del apartado de salinidad de los materiales litológicos.
- A Jesús Betrán por su detallada revisión de los capítulos Clima, Suelo y Geología.
- A Victor Arqued, Antonio Azcón y Miguel García por la revisión del capítulo de Hidrología subterránea.
- A Poncio, muy especialmente, y a Sonia por su ayuda permanente e incondicional.
- A Lola, que ha sido durante muchos años, mi mayor ayuda y mi mejor compañía en el campo y en el laboratorio.
- A Espe, Luis, José M^a, Jesús, M^a José y Octavio por su apoyo en los numerosos momentos de crisis.
- A Antonio Martínez-Cob por su disponibilidad y constante ayuda en temas de geoestadística, meteorología e informática.
- A Rosa, Ramón, Octavio, M^a José, Conchita, Santiago y Enrique por su ayuda en las representaciones gráficas.
- A Lola Quílez por su colaboración en el apartado de hidrología superficial.
- A todo el personal del Departamento de Suelos y Riegos del Servicio de Investigación

Agraria por su compañía.

- A Ignacio Terés por su desinteresada colaboración.
- A Francisco J. Escanilla por la aportación de los datos meteorológicos de la estación de Bujaraloz "Rozas".
- A los propietarios de pozos en Bujaraloz y Candasnos por permitirnos realizar medidas en sus domicilios.
- Al personal de las oficinas de la D.G.A. en Bujaraloz y Candasnos durante 1987-1989 por la ayuda material prestada.
- A Carlos Hervera y Carlos Ballarín de TRAGSA por su interés en la comprobación de las nivelaciones de puntos de agua.
- A los que me mostraron la parte deshonesto, competitiva, desleal y aprovechada de la investigación, por su participación decisiva en la finalización de este trabajo.

INDICES

INDICE DE MATERIAS

TOMO I: MEMORIA

1. INTRODUCCION	1
2. CLIMA	3
2.1. INTRODUCCION	3
2.2. REVISION BIBLIOGRAFICA	3
2.3. MATERIAL Y METODOS	6
2.3.1. Recopilación de datos climáticos	6
2.3.2. Cálculo de la evapotranspiración de referencia	7
2.3.3. Evaporación en tanque clase A	7
2.4. RESULTADOS Y DISCUSION	11
2.4.1. Precipitación	17
2.4.2. Temperatura	23
2.4.3. Velocidad del viento	26
2.4.4. Evapotranspiración de referencia	26
2.4.5. Evaporación en tanque clase A.....	28
3.- SUELO	32
3.1. INTRODUCCION	32
3.2. REVISION BIBLIOGRAFICA	32
3.3. MATERIAL Y METODOS	36
3.3.1. Revisión y síntesis de la cartografía de suelos	36
3.3.1. Seguimiento de la salinidad de los suelos regados en Monegros II	37
3.4. RESULTADOS Y DISCUSION	39
3.4.1. Revisión y síntesis de la cartografía de suelos	39
3.4.2. Seguimiento de la salinidad de los suelos regados en Monegros II	41

3.4.2.1. Calibración del sensor electromagnético	42
3.4.2.2. Evolución temporal de la salinidad del suelo	44
3.4.2.3. Variabilidad espacial de la salinidad del suelo	50
4. GEOLOGIA	59
4.1. INTRODUCCION	59
4.2. REVISION BIBLIOGRAFICA	60
4.3. MATERIAL Y METODOS	68
4.3.1. Geología	68
4.3.2. Salinidad de los materiales litológicos	70
4.3.3. Prospección geoelectrica Wenner	72
4.4. RESULTADOS Y DISCUSION	76
4.4.1. Geología	76
4.4.1.1. Revisión cartográfica y descripción de sondeos	76
4.4.1.2. Láminas delgadas	83
4.4.2. Salinidad de los materiales litológicos	84
4.4.2.1. Ensayo 1: Disolución de los materiales litológicos en agua destilada.....	84
4.4.2.2. Ensayo 2: Efecto del tamaño de grano sobre la tasa de disolución.....	95
4.4.2.3. Ensayo 3: Efecto de la composición química del disolvente	98
4.4.3. Prospección geoelectrica Wenner	121
4.4.3.1. Sectores I y II	121
4.4.3.2. Sondeos	127
4.4.3.3. Pozos	136
4.4.3.4. Estimación de los niveles freáticos	142

5. HIDROLOGIA SUPERFICIAL	145
5.1. INTRODUCCION	145
5.2. REVISION BIBLIOGRAFICA	148
5.3. MATERIAL Y METODOS	153
5.3.1. Descripción física de las cuencas hidrológicas	153
5.3.2. Barranco de Valcuerna	155
5.3.3. Areas endorreicas	165
5.3.4. Río Ebro	169
5.4. RESULTADOS Y DISCUSION	170
5.4.1. Descripción física de las cuencas hidrológicas	170
5.4.2. Barranco de Valcuerna	176
5.4.2.1. Estación de aforos y calidad del agua	176
5.4.2.2. Cálculo de los componentes del hidrograma	185
5.4.2.3. Muestreo del Barranco de Valcuerna	190
5.4.2.4. Estimación de la componente subterránea	196
5.4.2.5. Balance de Masas	202
5.4.3. Areas endorreicas	205
5.4.3.1. Clasificación hidrológica	205
5.4.3.2. Balance hídrico	222
5.4.3.3. Hidroquímica	227
5.4.4. Río Ebro	244
6. HIDROLOGIA SUBTERRANEA	248
6.1. INTRODUCCION	248
6.2. REVISION BIBLIOGRAFICA	248
6.3. MATERIAL Y METODOS	251
6.3.1. Inventario de puntos de agua: Piezometría e hidroquímica....	251
6.3.2. Perforación de los sondeos	257
6.3.3. Parámetros hidrogeológicos fundamentales	258
6.3.4. Perfiles CE-T ^a	259
6.3.5. Correlación entre niveles saturados	259
6.3.6. Relaciones entre la precipitación y el nivel de agua.....	259

6.3.7. Relaciones entre las aguas subterráneas y las aguas lagunares	261
6.3.8. Balance hídrico	262
6.4. RESULTADOS Y DISCUSION	263
6.4.1. Inventario de puntos de agua: piezometría e hidroquímica ...	263
6.4.2. Perforación de los sondeos	303
6.4.3. Parámetros hidrogeológicos fundamentales	305
6.4.4. Perfiles CE-Tª	310
6.4.5. Correlación entre niveles saturados	318
6.4.6. Relaciones entre la precipitación y el nivel de agua en los pozos y sondeos	341
6.4.6.1. Análisis de regresión simple	341
6.4.6.2. Análisis bivalente de las series de tiempo precipitación-nivel (período 1986-1990)	344
6.4.7. Relaciones entre las aguas subterráneas y las aguas lagunares	345
6.4.7.1. Experimento de evaporación	346
6.4.7.2. Aportación subterránea a las lagunas	352
6.4.8. Balance hídrico	354
6.4.8.1. Balance hídrico para el año medio histórico	354
6.4.8.2. Balance hídrico para el periodo 1986-1990	356
6.4.9. Funcionamiento hidrogeológico	363
7. RESUMEN Y CONCLUSIONES	365
8. BIBLIOGRAFIA CITADA	376
9. ANEXOS	Tomo II

INDICE DE MATERIAS

TOMO II: ANEXOS

1.- CLIMA

ANEXO1.....	1
-------------	---

2.- SUELO

ANEXO 2.....	11
--------------	----

3.- GEOLOGIA

ANEXO 3.....	13
--------------	----

4.- HIDROLOGIA SUPERFICIAL

ANEXO 4 : Datos de calado y caudal en la estación de aforos nº 231 (1986-1990).....	41
--	----

ANEXO 5 : Datos de conductividad eléctrica en la estación de aforos nº 231 (1986-1990).....	51
--	----

ANEXO 6 : Datos de CE y composición iónica en la estación de aforos nº 231.....	61
--	----

ANEXO 7 : Datos de CE a lo largo del Bco. de Valcuerna.....	65
---	----

ANEXO 8 : Datos de composición iónica a lo largo del Bco de Valcuerna...	67
--	----

ANEXO 9 : Fichas de inventario de lagunas.....	71
--	----

ANEXO 10: Ciclos de llenado y vaciado de lagunas.....	117
---	-----

ANEXO 11: Balances hídricos de lagunas.....	119
---	-----

ANEXO 12: CE y composición iónica de aguas de lluvia.....	135
---	-----

5.- HIDROLOGIA SUBTERRANEA

ANEXO 13: Fichas de inventario.....	139
ANEXO 14: Geoestadística	375
ANEXO 15: Ensayos de bombeo.....	377
ANEXO 16: Perfiles de CE-T^a.....	393
ANEXO 17: Análisis bivalente de series de tiempo.....	403

INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1 : CLIMA

- Tabla 1. Variable climática registrada (P), y estimada (ETo) en la estación climática de Bujaraloz durante el periodo 1986-1990.
- Tabla 2. Variables climáticas registradas (P, TMAX y TMIN) y estimadas (HRmin %, n/N, Udia y ETo) en la estación climática de Candasnos durante el periodo 1986-1990.
- Tabla 3. Variables climáticas registradas (P, TMAX y TMIN) y estimadas (HRmin %, n/N, Udia y ETo) en la estación climática de Caspe durante el periodo 1986-1990.
- Tabla 4. Variables climáticas registradas (P, TMAX y TMIN) y estimadas (HRmin %, n/N, Udia y ETo) en la estación climática de Castejón de Monegros durante el periodo 1986-1990.
- Tabla 5. Variables climáticas registradas (P, TMAX y TMIN) y estimadas (HRmin, n/N, Udia, ETo) en la estación climática de Chiprana "Torre Los Baños" durante el periodo 1986-1990.
- Tabla 6. Variables climáticas registradas (P, TMAX y TMIN) y estimadas (HRmin, n/N, Udia y ETo) en la estación climática de Escatrón durante el periodo 1986-1990.
- Tabla 7. Variables climáticas registradas (P, TMAX y TMIN) y estimadas (HRmin %, n/N, Udia y ETo) en la estación climática de Peñalba durante el periodo 1986-1990.
- Tabla 8. Variables climáticas registradas (P, TMAX y TMIN, HRmin, n/N, Udia) y estimadas (ETo) en la estación climática de Valfarta durante el periodo 1986-1990.
- Tabla 9. Precipitación mensual (mm) medida en los pluviómetros situados junto a las cubetas endorreicas. (-99 significa dato no disponible).

ANEXO 2: SUELO

- Tabla 1. Valores de CE_e (dS/m) para SEMH y SEMV en los puntos situados en la zona norte para diferentes fechas de muestreo.
- Tabla 2. Valores de CE_e (dS/m) para SEMH y SEMV en los puntos situados en la zona sur para diferentes fechas de muestreo.

ANEXO 3: GEOLOGIA

- Ficha Sondeo 1. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 13 m de profundidad realizado en Albacar (T.M. de Bujaraloz) dentro de la Fm. Yesos de Retuerta (Mioceno).
- Ficha Sondeo 2. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 13 m de profundidad realizado en Forcallo (T.M. de Peñalba) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).
- Ficha Sondeo 3. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 13 m de profundidad realizado en Valserenosa (T.M. de Peñalba) dentro del Mb. Los Arcos (Mioceno).
- Ficha Sondeo 4. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 13 m de profundidad realizado en Corral de Royo (T.M. de Peñalba) dentro del Mb. Los Arcos (Mioceno).
- Ficha Sondeo 5. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 13 m de profundidad realizado en Hoyo Agustín (T.M. de Bujaraloz) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).
- Ficha Sondeo 6. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 13 m de profundidad realizado en Mases de Francín (T.M. de Sástago) dentro de cuaternario sobre Mb. Bujaraloz.(Mioceno).
- Ficha Sondeo 7. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 13 m de profundidad realizado en Corral Viejo (T.M. de Peñalba) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).
- Ficha Sondeo 8. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 13 m de profundidad realizado en Mas de Senén (T.M. de Peñalba) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).
- Ficha Sondeo 9. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 13 m de profundidad realizado en Las Planas (T.M. de Bujaraloz) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).
- Ficha Sondeo 10. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 13 m de profundidad realizado en Los Fabares (T.M. de Candanos) dentro del Mb. Sigena (Mioceno).
- Ficha Sondeo 11. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 18 m de profundidad realizado en Hoyo Benamud (T.M. de Bujaraloz) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).
- Ficha Sondeo 12. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 18 m de profundidad realizado en Hoyo Benamud (T.M. de Bujaraloz) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).

- Ficha Sondeo 13. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 18 m de profundidad realizado en Hoyo Benamud (T.M. de Bujaraloz) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).
- Ficha Sondeo 14. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 18 m de profundidad realizado en Hoyo Benamud (T.M. de Bujaraloz) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).
- Ficha Sondeo 15. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 18 m de profundidad realizado en Hoyo Benamud (T.M. de Bujaraloz) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).
- Ficha Sondeo 16. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 18 m de profundidad realizado en Hoyo Benamud (T.M. de Bujaraloz) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).
- Ficha Sondeo 17. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 18 m de profundidad realizado en Hoyo Agustín (T.M. de Bujaraloz) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).
- Ficha Sondeo 18. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 18 m de profundidad realizado en Hoyo Agustín (T.M. de Bujaraloz) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).
- Ficha Sondeo 19. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 18 m de profundidad realizado en Hoyo Agustín (T.M. de Bujaraloz) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).
- Ficha Sondeo 20. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 18 m de profundidad realizado en Hoyo Agustín (T.M. de Bujaraloz) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).
- Ficha Sondeo 21. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 18 m de profundidad realizado en Hoyo Agustín (T.M. de Bujaraloz) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).
- Ficha Sondeo 22. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 18 m de profundidad realizado en Hoyo Agustín (T.M. de Bujaraloz) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).
- Ficha Sondeo 23. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 18 m de profundidad realizado en Hoyo Agustín (T.M. de Bujaraloz) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).
- Ficha Sondeo 24. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 18 m de profundidad realizado en Hoyo Agustín (T.M. de Bujaraloz) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).
- Ficha Sondeo 25. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 18 m de profundidad realizado en Hoyo Agustín (T.M. de Bujaraloz) dentro del

Mb. Bujaraloz (Mioceno).

Ficha Sondeo 26. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 18 m de profundidad realizado en Hoyo Agustín (T.M. de Bujaraloz) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).

Ficha Sondeo 27. Descripción litológica del sondeo de reconocimiento de 120 m de profundidad realizado en Hoyo Agustín (T.M. de Bujaraloz) dentro del Mb. Bujaraloz (Mioceno).

ANEXO 4: HIDROLOGIA SUPERFICIAL (Barranco de Valcuerna)

Tabla 1. Datos de calado (metros) registrados con limnígrafo y datos de caudal (m³/s) obtenidos a través de la curva de gasto de la E.A. n° 231 durante el primer semestre de 1986.

Tabla 2. Datos de calado (metros) registrados con limnígrafo y datos de caudal (m³/s) obtenidos a través de la curva de gasto de la E.A. n° 231 durante el segundo semestre de 1986.

Tabla 3. Datos de calado (metros) registrados con limnígrafo y datos de caudal (m³/s) obtenidos a través de la curva de gasto de la E.A. n° 231 durante el primer semestre de 1987.

Tabla 4. Datos de calado (metros) registrados con limnígrafo y datos de caudal (m³/s) obtenidos a través de la curva de gasto de la E.A. n° 231 durante el segundo semestre de 1987.

Tabla 5. Datos de calado (metros) registrados con limnígrafo y datos de caudal (m³/s) obtenidos a través de la curva de gasto de la E.A. n° 231 durante el primer semestre de 1988.

Tabla 6. Datos de calado (metros) registrados con limnígrafo y datos de caudal (m³/s) obtenidos a través de la curva de gasto de la E.A. n° 231 durante el segundo semestre de 1988.

Tabla 7. Datos de calado (metros) registrados con limnígrafo y datos de caudal (m³/s) obtenidos a través de la curva de gasto de la E.A. n° 231 durante el primer semestre de 1989.

Tabla 8. Datos de calado (metros) registrados con limnígrafo y datos de caudal (m³/s) obtenidos a través de la curva de gasto de la E.A. n° 231 durante el segundo semestre de 1989.

Tabla 9. Datos de calado (metros) registrados con limnígrafo y datos de caudal (m³/s) obtenidos a través de la curva de gasto de la E.A. n° 231 durante el primer semestre de 1990.

Tabla 10. Datos de calado (metros) registrados con limnógrafo y datos de caudal (m^3/s) obtenidos a través de la curva de gasto de la E.A. n° 231 durante el segundo semestre de 1990.

ANEXO 5: HIDROLOGIA SUPERFICIAL (Barranco de Valcuerna)

Tabla 1. Conductividad eléctrica media diaria (CE, dS/m a $25^\circ C$) en la E.A. n° 231 durante el primer semestre de 1986.

Tabla 2. Conductividad eléctrica media diaria (CE, dS/m a $25^\circ C$) en la E.A. n° 231 durante el segundo semestre de 1986.

Tabla 3. Conductividad eléctrica media diaria (CE, dS/m a $25^\circ C$) en la E.A. n° 231 durante el primer semestre de 1987.

Tabla 4. Conductividad eléctrica media diaria (CE, dS/m a $25^\circ C$) en la E.A. n° 231 durante el segundo semestre de 1987.

Tabla 5. Conductividad eléctrica media diaria (CE, dS/m a $25^\circ C$) en la E.A. n° 231 durante el primer semestre de 1988.

Tabla 6. Conductividad eléctrica media diaria (CE, dS/m a $25^\circ C$) en la E.A. n° 231 durante el segundo semestre de 1988.

Tabla 7. Conductividad eléctrica media diaria (CE, dS/m a $25^\circ C$) en la E.A. n° 231 durante el primer semestre de 1989.

Tabla 8. Conductividad eléctrica media diaria (CE, dS/m a $25^\circ C$) en la E.A. n° 231 durante el segundo semestre de 1989.

Tabla 9. Conductividad eléctrica media diaria (CE, dS/m a $25^\circ C$) en la E.A. n° 231 durante el primer semestre de 1990.

Tabla 10. Conductividad eléctrica media diaria (CE, dS/m a $25^\circ C$) en la E.A. n° 231 durante el segundo semestre de 1990.

ANEXO 6 : HIDROLOGIA SUPERFICIAL (Barranco de Valcuerna)

Tabla 1. Conductividad eléctrica (CE, dS/m a $25^\circ C$) y composición iónica de las aguas del Barranco de Valcuerna en la E.A. n° 231 en diferentes fechas de muestreo de 1987.

Tabla 2. Conductividad eléctrica (CE, dS/m a $25^\circ C$) y composición iónica de las aguas del Barranco de Valcuerna en la E.A. n° 231 en diferentes fechas de muestreo de 1988.

Tabla 3. Conductividad eléctrica (CE, dS/m a 25 °C) y composición iónica de las aguas del Barranco de Valcuerna en la E.A. n° 231 en diferentes fechas de muestreo de 1989.

Tabla 4. Conductividad eléctrica (CE, dS/m a 25 °C) y composición iónica de las aguas del Barranco de Valcuerna en la E.A. n° 231 en diferentes fechas de muestreo de 1990.

ANEXO 7: HIDROLOGIA SUPERFICIAL (Barranco de Valcuerna)

Tabla 1. Conductividad eléctrica (CE, dS/m a 25 °C) en los puntos de muestreo V-1 a V-10 localizados entre la boca Sur del Túnel de Alcubierre y el Embalse de Mequinenza y Caudal (m³/s) a la salida del Túnel y en la E.A. n° 231 durante 1987 y 1988.

Tabla 2. Conductividad eléctrica (CE, dS/m a 25 °C) en los puntos de muestreo V-1 a V-10 localizados entre la boca Sur del Túnel de Alcubierre y el Embalse de Mequinenza y Caudal (m³/s) a la salida del Túnel y en la E.A. n° 231 durante 1989 y 1990.

ANEXO 8: HIDROLOGIA SUPERFICIAL (Barranco de Valcuerna)

Tabla 1. Conductividad eléctrica (CE, dS/m a 25 °C) y composición iónica (meq/L) en los puntos de muestreo del Bco. de Valcuerna entre la boca Sur del Tunel de Alcubierre y el embalse de Mequinenza durante el mes de (a) Mayo (b) Julio y (c) Septiembre de 1987.

Tabla 2. Conductividad eléctrica (CE, dS/m a 25 °C) y composición iónica (meq/L) en los puntos de muestreo del Bco. de Valcuerna entre la boca Sur del Tunel de Alcubierre y el embalse de Mequinenza durante el mes de (a) Febrero (b) Marzo (c) Mayo (d) Junio y (e) Agosto de 1988.

Tabla 3. Conductividad eléctrica (CE, dS/m a 25 °C) y composición iónica (meq/L) en los puntos de muestreo del Bco. de Valcuerna entre la boca Sur del Tunel de Alcubierre y el embalse de Mequinenza durante el mes de Febrero de 1989.

ANEXO 9: HIDROLOGIA SUPERFICIAL (Areas endorreicas)

Ficha de Laguna 1. Localización geográfica y geológica, cota del fondo (m.s.n.m.), superficie de máxima inundación (Km²) e inundada en el periodo 1987-1990, fechas de muestreo y análisis iónico del agua libre, del sedimento y del agua intersticial del sedimento de la Laguna Amarga I.

Ficha de Laguna 2. Localización geográfica y geológica, cota del fondo (m.s.n.m.), superficie de máxima inundación (Km²) e inundada en el periodo 1987-1990,

fechas de muestreo y análisis iónico del agua libre, del sedimento y del agua intersticial del sedimento de la Laguna Amarga II.

- Ficha de Laguna 3. Localización geográfica y geológica, cota del fondo (m.s.n.m.), superficie de máxima inundación (Km²) e inundada en el periodo 1987-1990, fechas de muestreo y análisis iónico del agua libre, del sedimento y del agua intersticial del sedimento de la Laguna Camarón.
- Ficha de Laguna 4. Localización geográfica y geológica, cota del fondo (m.s.n.m.), superficie de máxima inundación (Km²) e inundada en el periodo 1987-1990, fechas de muestreo y análisis iónico del agua libre, del sedimento y del agua intersticial del sedimento de la Laguna Guallar.
- Ficha de Laguna 5. Localización geográfica y geológica, cota del fondo (m.s.n.m.), superficie de máxima inundación (Km²) e inundada en el periodo 1987-1990, fechas de muestreo y análisis iónico del agua libre, del sedimento y del agua intersticial del sedimento de la Laguna Muerte.
- Ficha de Laguna 6. Localización geográfica y geológica, cota del fondo (m.s.n.m.), superficie de máxima inundación (Km²) e inundada en el periodo 1987-1990, fechas de muestreo y análisis iónico del agua libre, del sedimento y del agua intersticial del sedimento de la Laguna Pez.
- Ficha de Laguna 7. Localización geográfica y geológica, cota del fondo (m.s.n.m.), superficie de máxima inundación (Km²) e inundada en el periodo 1987-1990, fechas de muestreo y análisis iónico del agua libre, del sedimento y del agua intersticial del sedimento de la Laguna Piñol.
- Ficha de Laguna 8. Localización geográfica y geológica, cota del fondo (m.s.n.m.), superficie de máxima inundación (Km²) e inundada en el periodo 1987-1990, fechas de muestreo y análisis iónico del agua libre, del sedimento y del agua intersticial del sedimento de la Laguna Pito.
- Ficha de Laguna 9. Localización geográfica y geológica, cota del fondo (m.s.n.m.), superficie de máxima inundación (Km²) e inundada en el periodo 1987-1990, fechas de muestreo y análisis iónico del agua libre, del sedimento y del agua intersticial del sedimento de la Laguna Playa.
- Ficha de Laguna 10. Localización geográfica y geológica, cota del fondo (m.s.n.m.), superficie de máxima inundación (Km²) e inundada en el periodo 1987-1990, fechas de muestreo y análisis iónico del agua libre, del sedimento y del agua intersticial del sedimento de la Laguna Pueyo.
- Ficha de Laguna 11. Localización geográfica y geológica, cota del fondo (m.s.n.m.), superficie de máxima inundación (Km²) e inundada en el periodo 1987-1990, fechas de muestreo y análisis iónico del agua libre, del sedimento y del agua intersticial del sedimento de la Laguna Rebollón.
- Ficha de Laguna 12. Localización geográfica y geológica, cota del fondo (m.s.n.m.), superficie

de máxima inundación (Km²) e inundada en el periodo 1987-1990, fechas de muestreo y análisis iónico del agua libre, del sedimento y del agua intersticial del sedimento de la Laguna Rollico.

Ficha de Laguna 13. Localización geográfica y geológica, cota del fondo (m.s.n.m.), superficie de máxima inundación (Km²) e inundada en el periodo 1987-1990, fechas de muestreo y análisis iónico del agua libre, del sedimento y del agua intersticial del sedimento de la Laguna Saladar.

Ficha de Laguna 14. Localización geográfica y geológica, cota del fondo (m.s.n.m.), superficie de máxima inundación (Km²) e inundada en el periodo 1987-1990, fechas de muestreo y análisis iónico del agua libre, del sedimento y del agua intersticial del sedimento de la Laguna Salineta.

Ficha de Laguna 15. Localización geográfica y geológica, cota del fondo (m.s.n.m.), superficie de máxima inundación (Km²) e inundada en el periodo 1987-1990, fechas de muestreo y análisis iónico del agua libre, del sedimento y del agua intersticial del sedimento de la Laguna Salobral.

ANEXO 10: HIDROLOGIA SUPERFICIAL (Areas endorreicas)

Tabla 1. Ciclo de llenado y vaciado de lagunas: Observaciones de presencia (1) o ausencia (0) de lámina de agua libre en las lagunas durante el periodo 1987-1990.

ANEXO 11: HIDROLOGIA SUPERFICIAL (Areas endorreicas)

Tabla 1. Volumen de agua mensual (m³) estimado para la laguna Amarga I en el período Enero de 1989 a Septiembre de 1990 con los diferentes balances. En la segunda columna, observaciones de presencia (1) o ausencia de agua (0).

Tabla 2. Volumen de agua mensual (m³) estimado para la laguna Amarga II en el período Enero de 1989 a Septiembre de 1990 con los diferentes balances. En la segunda columna, observaciones de presencia (1) o ausencia de agua (0).

Tabla 3. Volumen de agua mensual (m³) estimado para la laguna Camarón en el período Enero de 1989 a Septiembre de 1990 con los diferentes balances. En la segunda columna, observaciones de presencia (1) o ausencia de agua (0).

Tabla 4. Volumen de agua mensual (m³) estimado para la laguna Guallar en el período Enero de 1989 a Septiembre de 1990 con los diferentes balances. En la segunda columna, observaciones de presencia (1) o ausencia de agua (0).

Tabla 5. Volumen de agua mensual (m³) estimado para la laguna Muerte en el período Enero de 1989 a Septiembre de 1990 con los diferentes balances. En la segunda columna, observaciones de presencia (1) o ausencia de agua (0).

- Tabla 6. Volumen de agua mensual (m³) estimado para la laguna Pez en el período Enero de 1989 a Septiembre de 1990 con los diferentes balances. En la segunda columna, observaciones de presencia (1) o ausencia de agua (0).
- Tabla 7. Volumen de agua mensual (m³) estimado para la laguna Piñol en el período Enero de 1989 a Septiembre de 1990 con los diferentes balances. En la segunda columna, observaciones de presencia (1) o ausencia de agua (0).
- Tabla 8. Volumen de agua mensual (m³) estimado para la laguna Pito en el período Enero de 1989 a Septiembre de 1990 con los diferentes balances. En la segunda columna, observaciones de presencia (1) o ausencia de agua (0).
- Tabla 9. Volumen de agua mensual (m³) estimado para la laguna Playa en el período Enero de 1989 a Septiembre de 1990 con los diferentes balances. En la segunda columna, observaciones de presencia (1) o ausencia de agua (0).
- Tabla 10. Volumen de agua mensual (m³) estimado para la laguna Pueyo en el período Enero de 1989 a Septiembre de 1990 con los diferentes balances. En la segunda columna, observaciones de presencia (1) o ausencia de agua (0).
- Tabla 11. Volumen de agua mensual (m³) estimado para la laguna Rebollón en el período Enero de 1989 a Septiembre de 1990 con los diferentes balances. En la segunda columna, observaciones de presencia (1) o ausencia de agua (0).
- Tabla 12. Volumen de agua mensual (m³) estimado para la laguna Rollico en el período Enero de 1989 a Septiembre de 1990 con los diferentes balances. En la segunda columna, observaciones de presencia (1) o ausencia de agua (0).
- Tabla 13. Volumen de agua mensual (m³) estimado para la laguna Saladar en el período Enero de 1989 a Septiembre de 1990 con los diferentes balances. En la segunda columna, observaciones de presencia (1) o ausencia de agua (0).
- Tabla 14. Volumen de agua mensual (m³) estimado para la laguna Salineta en el período Enero de 1989 a Septiembre de 1990 con los diferentes balances. En la segunda columna, observaciones de presencia (1) o ausencia de agua (0).
- Tabla 15. Volumen de agua mensual (m³) estimado para la laguna Salobral en el período Enero de 1989 a Septiembre de 1990 con los diferentes balances. En la segunda columna, observaciones de presencia (1) o ausencia de agua (0).

ANEXO 12: HIDROLOGIA SUPERFICIAL (Áreas endorreicas)

- Tabla 1. Conductividad eléctrica y composición iónica de las aguas de lluvia recogidas en el pluviómetro situado junto al Hoyo Agustín, laguna Amarga y Hoyo Benamud en diferentes fechas de muestreo.
- Tabla 2. Conductividad eléctrica y composición iónica de las aguas de lluvia recogidas en el pluviómetro situado junto a las lagunas Camarón, Guallar y Piñol en diferentes fechas de muestreo.

Tabla 3. Conductividad eléctrica y composición iónica de las aguas de lluvia recogidas en el pluviómetro situado junto a las lagunas Playa, Salineta y Barranco de Valcuerna en diferentes fechas de muestreo.

ANEXO 13: HIDROLOGIA SUBTERRANEA (Fichas de inventario)

Fichas de inventario de 72 puntos de agua. Localización geográfica, geomorfológica y geológica. Medidas de nivel piezométrico, cota del agua, CE y composición iónica en diferentes fechas durante el periodo 1986-1990. Gráfica de evolución temporal de la cota del agua y de la precipitación. Gráfica de la evolución temporal de la composición iónica del agua. En sondeos se presenta igualmente, datos de los ensayos de bombeo-recuperación.

ANEXO 14: HIDROLOGIA SUBTERRANEA (Geoestadística para generación de mapa de isopiezas).

Figura 1. Semivariogramas direccionales (a) 0° y (b) 45° de la variable cota del agua (m.s.n.m.) de puntos de agua de Monegros II.

Figura 2. Desviaciones estándar de los errores mínimos esperados de la cota del agua para cuadrículas de una unidad de distancia (semivariograma lineal anisotrópico).

Figura 3. Mapa de isopiezas : Estimaciones de cota de agua obtenidas con Krigeado para cuadrículas de una unidad de distancia (semivariograma lineal anisotrópico).

ANEXO 15: HIDROLOGIA SUBTERRANEA (Ensayos de bombeo)

- Figura 1. Ensayo de recuperación en el sondeo 2.
- Figura 2. Ensayo de recuperación en el sondeo 7.
- Figura 3. Ensayo de recuperación en el sondeo 8.
- Figura 4. Ensayo de recuperación en el sondeo 11.
- Figura 5. Ensayo de recuperación en el sondeo 12.
- Figura 6. Ensayo de recuperación en el sondeo 13.
- Figura 7. Ensayo de recuperación en el sondeo 15.
- Figura 8. Ensayo de recuperación en el sondeo 16.
- Figura 9. Ensayo de recuperación en el sondeo 17.
- Figura 10. Ensayo de recuperación en el sondeo 18.
- Figura 11. Ensayo de recuperación en el sondeo 20.
- Figura 12. Ensayo de recuperación en el sondeo 21.
- Figura 13. Ensayo de recuperación en el sondeo 22.
- Figura 14. Ensayo de recuperación en el sondeo 23.
- Figura 15. Ensayo de recuperación en el sondeo 24.
- Figura 16. Ensayo de recuperación en el sondeo 25.

ANEXO 16: HIDROLOGIA SUBTERRANEA (Perfiles de CE-T^a)

- Tabla 1. Conductividad eléctrica y temperatura del agua a diferentes profundidades obtenidas en los sondeos 2, 3, 5 y 7 en Enero de 1991 y Abril de 1991.
- Tabla 2. Conductividad eléctrica y temperatura del agua a diferentes profundidades obtenidas en los sondeos 8, 9 y 10 en Enero de 1991 y Abril de 1991.
- Tabla 3. Conductividad eléctrica y temperatura del agua a diferentes profundidades obtenidas en los sondeos 11 y 12 en Enero de 1991 y Abril de 1991.
- Tabla 4. Conductividad eléctrica y temperatura del agua a diferentes profundidades obtenidas en los sondeos 13, 14 y 15 en Enero de 1991 y Abril de 1991.
- Tabla 5. Conductividad eléctrica y temperatura del agua a diferentes profundidades obtenidas en los sondeos 16 y 17 en Enero de 1991 y Abril de 1991.
- Tabla 6. Conductividad eléctrica y temperatura del agua a diferentes profundidades obtenidas en los sondeos 18, 19 y 20 en Enero de 1991 y Abril de 1991.
- Tabla 7. Conductividad eléctrica y temperatura del agua a diferentes profundidades obtenidas en los sondeos 21, 22 y 23 en Enero de 1991 y Abril de 1991.
- Tabla 8. Conductividad eléctrica y temperatura del agua a diferentes profundidades obtenidas en los sondeos 24, 25 y 26 en Enero de 1991 y Abril de 1991.

ANEXO 17: HIDROLOGIA SUBTERRANEA (Análisis bivariante de las series de tiempo)

- Tabla 1. Análisis bivariante de series de tiempo entre precipitación mensual en Bujaraloz (variable X) y la profundidad del agua en pozos (variable Y).
- Tabla 2. Análisis bivariante de series de tiempo entre precipitación mensual en Bujaraloz (variable X) y la profundidad del agua en sondeos (variable Y).

RELACION DE ABREVIATURAS

CLIMA

ET ₀	Evapotranspiración de referencia (media mensual (mm/día))
ETP	Evapotranspiración potencial
P	Precipitación
T	Temperatura
ETR	Evapotranspiración real
T _{max}	Temperatura máxima
T _{min}	Temperatura mínima
HR _{min}	(Media mensual de la) humedad relativa mínima diaria del aire
n/N	(Media mensual del) cociente entre la insolación real diaria y la insolación máxima posible diaria
U _{día}	(Media mensual de la) velocidad diurna diaria del viento (m/s) a 2 m sobre el nivel del suelo.
E	Evaporación
U ₂₄	Recorrido diario del viento
CV	Coefficiente de variación

SUELO

SEM	Sensor electromagnético
ha	Hectáreas
CE	Conductividad eléctrica (dS/m a 25° C)
CE _a	Conductividad eléctrica aparente
SEM _H	Sensor electromagnético horizontal (medida de 0-1 m)
SEM _V	Sensor electromagnético vertical (medida de 0-2 m)
CE _s	Conductividad eléctrica en el extracto de saturación
CE _{1:5}	Conductividad eléctrica en el extracto 1:5 (suelo/agua)
RAS	Relación de adsorción de sodio
Mb.	Miembro
Fm.	Formación
s	Suelos salinos
y	Suelos con yeso

GEOLOGIA

S.E.V.	Sondeo eléctrico vertical
CE	Conductividad eléctrica
UTM	Universal Transversal Mercator
CE _a	Conductividad eléctrica aparente
CE _{ac}	Conductividad eléctrica aparente acumulada
W-n	Punto de medida con dispositivo Wenner (n de 1 a 8) en sectores de inmediata puesta en regadío.
S-n	Punto de medida con dispositivo Wenner junto a sondeos (n de 1 a 10)
R _a	Resistividad aparente
a	Separación interelectródica
IS	Índice de saturación

PAI	Producto de actividad iónica
Kt	Producto de salinidad
PK _{sp}	Producto de solubilidad
AC	Agua saturada en calcita
AD	Agua desionizada
AM	Agua (del canal) de Monegros
SS	Solución salina (NaCl)
SY	Solución de yeso (solución saturada en yeso)
SC	Solución de calcita (solución saturada en calcita)
TDS	Total de sólidos disueltos
I	Fuerza iónica efectiva
I _{sy}	Efecto salino de la solución de yeso
I _{ss}	Efecto salino de la solución de NaCl
TDS _i	Total de sales disueltas aportadas por el material litológico
TDS _o	Total de sales disueltas obtenido en agua desionizada
ET	Evapotranspiración
P	Precipitación
SEM	Sensor electromagnético
e.s.e.	Error estándar de estimación
r	Coefficiente de correlación
R ²	Coefficiente de determinación
D	Perfil de descarga
R	Perfil de recarga
U	Perfil uniforme

HIDROLOGIA SUPERFICIAL

Ce ₁	Coefficiente de escorrentía obtenido por descomposición de hidrograma unitario
Ce ₂	Coefficiente de escorrentía medio
E.A.nº 231	Estación de aforos C.H.E. nº 231.
Q	Caudal
h	Calado
PVC	Cloruro de polivinilo
T	Tiempo
A	Area de cuenca hidrológica superficial
V ₁	Volumen total de agua caído en la cuenca hidrológica superficial
V ₂	Volumen de agua correspondiente a escorrentía superficial
V-i	Puntos de medida de CE a lo largo del cauce de Valcuerna (i de 1 a 10)
D-i	Puntos de rezume o manantiales a lo largo del cauce de Valcuerna (i de 1 a 6)
C	Concentración salina
Fc	Factor climático
Ff	Factor fisiográfico
Ac	Area de cuenca superficial de una laguna
Al ₁	Area de máxima inundación de una laguna
Al ₂	Area inundada de una laguna en un determinado momento
Cs	Coefficiente de escorrentía subsuperficial
E	Evaporación en lámina de agua libre
Hm ³	Hectómetro cúbico
Alt.max.	Altitud máxima
Alt.min.	Altitud mínima

d	Distancia (respecto al Tunel de Alcubierre) a la que se anula el flujo subterráneo
R.N.	Régimen natural
R.R.	Periodo de regadío
N.R.	Periodo de no riego
t	Toneladas
F.R.R.	Flujos de retorno de regadío ó efluente de riego
P'	Parte de la precipitación que se convierte en escorrentía (PxCe)
Er	Eficiencia de riego
Re	Porcentaje de la dotación de riego que pasa a percolación profunda
Vriego	Volumen de agua que se almacena en la laguna como consecuencia del regadío
Vevap	Volumen de agua potencialmente evaporable en cada laguna
Asub	Aguas subterráneas
Allu	Aguas de lluvia
AL	Agua libre
SS ₃₀	Sonda de succión instalada a 30 cm
SS ₆₀	Sonda de succión instalada a 60 cm
T ^a	Temperatura del agua
M	Masa de sales

HIDROLOGIA SUBTERRANEA

P-n	Punto de agua, pozo excavado
S-n	Punto de agua, sondeo
T _i	Nivelación (m.s.n.m.) realizada por TRAGSA
S _i	Estimación de cota sobre mapa escala 1:2000 realizada por S.I.A.
S _b	Coefficiente de almacenamiento
$\rho_{uv}(k)$	Coefficiente de correlación cruzada para el intervalo K
V	Val
D	Depresión
P	Plataforma
CT	Cota topográfica
CP	Cota piezométrica
ns	Nivel saturado
nt	Nivel transmisivo

1. INTRODUCCION

1. INTRODUCCION

El desarrollo del regadío en nuestro planeta ha conducido al establecimiento de florecientes áreas de expansión social y económica, por lo que puede afirmarse que la agricultura de regadío ha sido, y continuará siendo, una de las claves para el progreso de la humanidad (Hoffman et al., 1990).

Sin embargo, el desarrollo sostenido del regadío exige un profundo conocimiento del medio físico y de los procesos que se desarrollan en la transformación. La insuficiencia de estos conocimientos ha conducido a problemas serios, entre los que debe resaltarse la salinización de los suelos y aguas en una parte importante de las zonas áridas y semiáridas de nuestro planeta. Así, Szabolcs (1989) ha estimado en más de mil millones las hectáreas de suelos afectados por sales, con el agravante de que del orden de diez millones de hectáreas de regadío en todo el mundo son abandonadas anualmente como consecuencia de procesos de salinización, sodificación y encharcamiento. Este problema es asimismo de una magnitud considerable en la Cuenca del Ebro, ya que los suelos afectados por salinidad en distintas zonas regables declaradas de interés nacional suponen cerca de un 30% de 536.000 ha estudiadas (Herrero y Aragüés, 1988).

El desarrollo del Plan General de Transformación de la Zona Regable de la Segunda Parte del Canal de Monegros (también denominado proyecto Monegros II), aprobado según Real Decreto nº 1676 del BOE del 8-8-1986, tendrá sin lugar a dudas un efecto socioeconómico trascendental para la región. Sin embargo, el beneficio sostenido del proyecto Monegros II exige profundizar en el conocimiento de los posibles impactos negativos derivados de dicha transformación. Entre ellos, los procesos de ascenso de las aguas subterráneas, y la salinización del suelo y de los retornos del riego, son aspectos que pueden presentarse como lo han hecho, en mayor o menor medida, en la mayoría de las transformaciones realizadas en las zonas áridas y semiáridas.

En base a estas consideraciones, el trabajo que se presenta en esta memoria profundiza en el estudio de las relaciones clima-agua-suelo-subsuelo en un área de estudio del polígono de riego de Monegros II, con el objetivo último de contribuir a un conocimiento apropiado del sistema que coadyuve al establecimiento de una agricultura de regadío próspera y duradera.

El área de estudio seleccionada en esta memoria comprende los sectores de riego I, II, III, IV, VIII, IX, X, XI y parte del XII, lo que supone el 55% del polígono de riego de Monegros II. El límite Norte de esta zona está constituido por las estribaciones meridionales de la Sierra de Alcubierre, el Este por el Barranco de Roma (tributario del Barranco de Valcuerna) y el Barranco de Valcuerna hasta su desembocadura en el Embalse de Mequinenza, el Oeste por la Retuerta de Pina y su continuación hacia el sur por el Barranco de Valdecenicero, y el Sur por el río Ebro.

Los objetivos y trabajos parciales desarrollados en este área de estudio son:

- 1) Descripción climática, análisis de su variabilidad espacial y temporal y generación de datos climáticos necesarios para la elaboración de balances hídricos.

2) Distribución espacial de los tipos de suelos y su relación con la geología y geomorfología. En los sectores de riego I y II en transformación, implantación de una red de muestreo para establecer las pautas de evolución temporal y la variabilidad espacial de la salinidad de los suelos de regadío.

3) Síntesis de la cartografía geológica y determinación del contenido en sales solubles y de la composición iónica de los principales materiales litológicos.

4) Análisis de la fiabilidad y precisión de la prospección geoelectrica Wenner para la detección de zonas de recarga y descarga, y para la estimación de los niveles piezométricos.

5) Establecimiento de una red de muestreo de calidad del agua y una estación de aforos en el barranco de Valcuerna para la confección de balances hidrosalinos. Estimación del volumen de agua, salinidad y masa de sales exportadas en régimen natural por el Barranco de Valcuerna, y análisis de su evolución por efecto del regadío. Localización, cuantificación y caracterización hidroquímica de las descargas de agua subterránea al Barranco de Valcuerna.

6) Clasificación hidrológica, balances hídricos y caracterización hidroquímica de las áreas endorreicas; evolución por efecto del regadío.

7) Muestreo del río Ebro y del embalse de Mequinenza para la localización de posibles descargas provinientes del área de estudio.

8) Establecimiento de una red de control de las aguas subterráneas al objeto de definir sus características hidrogeológicas e hidroquímicas y efectuar una aproximación tentativa al funcionamiento hidrogeológico del área de estudio.

2. CLIMA

2. CLIMA

2.1. INTRODUCCION

En este apartado se presentan los siguientes trabajos: (1) revisión bibliográfica de la climatología de Monegros, (2) recopilación de los datos meteorológicos disponibles en la red de observatorios del Centro Meteorológico del Ebro situados dentro o en las proximidades del área de estudio, (3) análisis de los datos de las estaciones climáticas completas instaladas por el Servicio de Investigación Agraria de la Diputación General de Aragón en Valfarta y Candanos y (4) resumen de los datos de pluviometría procedentes de pluviómetros instalados junto a las zonas endorreicas más importantes del área de estudio.

Esta información se ha utilizado para: (1) describir climáticamente el área de estudio, (2) estimar parámetros climáticos, como la evapotranspiración de referencia, cuyas medidas directas resultaban inabordables dentro de este trabajo y (3) obtener las variables meteorológicas necesarias para la elaboración de un balance hídrico, aspecto indispensable para establecer posteriormente el funcionamiento hídrico del área de estudio.

2.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El área de estudio dispone de un número muy limitado, en cantidad y calidad, de estaciones de la Red Meteorológica Nacional, lo que constituye una restricción importante para efectuar estudios meteorológicos profundos.

De los estudios climáticos previos, sólo se referencian los que se han centrado en el Valle del Ebro o los que recopilan información acerca de las estaciones situadas en Monegros II.

Biel y García de Pedraza (1962) efectuaron, para el Valle Medio del Ebro y el período 1926 a 1955, un estudio estadístico de los siguientes factores climáticos: altitud geográfica, altitud sobre el nivel del mar (320-350 m.s.n.m.), topografía y proximidad al mar. En función de estos factores, caracterizan el clima del Valle Medio del Ebro como "de tipo continental, árido (suelos áridos y subsalinos y vegetación esteparia), templado con tendencia a extremado, seco, fuertemente iluminado en verano y brumoso en invierno, ventoso con irregularidad, con predominio de cielos despejados e insolación fuerte".

Posteriormente, Liso y Ascaso (1969) efectuaron una recopilación de datos climáticos de la Cuenca del Ebro al objeto de realizar una clasificación climática zonal. Para ello calcularon la evapotranspiración potencial (ETP) por el método de Thornthwaite (1948) en 220 estaciones de la Cuenca del Ebro, colaborando así a la unificación metodológica con otros estudios precedentes y con los realizados en otras zonas por este mismo método.

El método de cálculo de la ETP utilizado por estos autores ha sido posteriormente muy cuestionado, especialmente cuando se aplica en áreas de climatología distinta a la de

la zona donde se desarrolló y calibró inicialmente, debido a que en su formulación interviene solamente una (la temperatura) de las muchas variables que afectan a la evapotranspiración (Sharma, 1985), además de estar basado en una definición vaga que permite distintas interpretaciones del concepto de evapotranspiración potencial (Burman et al, 1983). Concretamente, para zonas semiáridas y situadas a altitudes bajas como es el caso de Monegros II, el valor de la ETP estimado, tanto por este método como por el de SCS Blaney-Cridde, está claramente infraestimado (Cuenca, 1989). A pesar de ello, el método de Thornthwaite ha sido muy utilizado incluso en estudios recientes (Ministerio de Obras Públicas-Consejo Superior de Investigaciones Científicas MOPU-CSIC, 1989; Cuas y García, 1990), debido posiblemente en parte a que la temperatura es una de las medidas climáticas más extendida y fiable.

La clasificación que presentan Liso y Ascaso (1969) para las estaciones de Escatrón, Caspe y Bujaraloz es muy similar: "clima semiárido, mesotérmico, con una ETP del año medio de 855 mm en Escatrón, 799 mm en Caspe y 778 mm en Bujaraloz y sin exceso de agua".

Elías y Ruiz (1977) confeccionaron una serie de fichas climáticas con fines agrícolas mediante la clasificación climática de Papadakis para estaciones de toda España, entre las que se encuentran las estaciones de Bujaraloz, Caspe y Escatrón. La clasificación climática de las dos primeras es similar (régimen térmico templado-cálido y régimen de humedad mediterráneo-seco, por lo que el tipo climático es "mediterráneo templado"), mientras que la de Escatrón tiene un régimen térmico subtropical-cálido, un régimen de humedad mediterráneo-seco y, consecuentemente, un tipo climático "mediterráneo subtropical".

El Instituto Agronómico Mediterráneo de Zaragoza (I.A.M.Z., 1980) ha efectuado una recopilación de temperaturas y pluviometrías en las estaciones de Sariñena, Bujaraloz y Caspe con los siguientes resultados: la temperatura media anual de las tres estaciones es similar (14,6 °C), así como la duración de la estación de heladas (Noviembre-Febrero) y el hecho de que las tres están situadas dentro de la isoyeta de 400 mm (aunque gran parte de la zona de Monegros lo está dentro de la isoyeta de 350 mm), mientras que la ETP anual calculada por el método de Thornthwaite es de 975, 778 y 798 mm, respectivamente. La clasificación climática para la zona de Monegros es de tipo continental, caracterizado por temperaturas muy elevadas en verano y muy bajas en invierno y una sequía bastante pronunciada. El estudio de suelos de Recursos Naturales S.A. (RENASA, 1981) presenta un apartado de clima en el que se resumen las características climáticas de las estaciones de Zaragoza, Bujaraloz y Fraga, en los aspectos de P, T y ETP (método de Thornthwaite). Los valores de ETP (aunque en el estudio se consideran infraestimados) coinciden con los de Liso y Ascaso (1969). Una comparación de las principales variables climáticas de estas tres estaciones con estaciones situadas en las proximidades permite concluir que la temperatura aumenta de norte a sur, aspecto no asociado a una disminución de la lluvia en esta misma dirección. El clima de la zona se define como "semiárido, con un déficit de humedad de Marzo a Septiembre".

El Plan General de Transformación del área Monegros II (1985) recoge los datos expuestos en el estudio de RENASA (1981), sin ampliar las series de datos de P y T ni hacer nuevas aportaciones.

En el Atlas Agroclimático de España (De León y Forteza, 1986) se presenta una recopilación de las principales variables climáticas para el conjunto de estaciones de la red nacional del Servicio Nacional de Meteorología.

Un año después aparecen más detalladamente presentadas en la Caracterización Agroclimática de la provincia de Zaragoza (De León et al., 1987). Para esta caracterización agroclimática se han tenido en cuenta características térmicas (temperatura media, período frío, período cálido), pluviométricas y de humedad (precipitación media, evapotranspiración potencial, período seco), relaciones clima-vegetación (vegetación cultivada, Papadakis), vegetación natural e índice de potencialidad agrícola. La clasificación agroclimática de Papadakis para las estaciones de Monegros no es tan homogénea como las de los autores antes citados. Así, Bujaraloz se clasifica como mediterráneo continental templado, Caspe como mediterráneo semiárido continental y Escatrón como mediterráneo subtropical.

El Instituto Nacional de Meteorología presenta anualmente un calendario meteorológico consistente en una recopilación de los datos meteorológicos medios mensuales de un número limitado de estaciones, agrupados por cuencas hidrológicas. Concretamente en la Cuenca del Ebro, la estación más cercana al área de estudio de la que se presentan datos es Zaragoza. La clasificación para la Cuenca del Ebro se efectúa en función del volumen total de precipitación anual, así 1986 se considera un año seco, 1987 muy seco, y 1988, 1989 y 1990 secos.

Los estudios de impacto ambiental de la transformación en regadío de Monegros contienen, asimismo, recopilaciones de datos climáticos. Dentro de ellos, el del MOPU-CSIC (1989) recopila datos de 11 estaciones para el período 1940-1980, presentando valores medios anuales de P y T a partir de los cuales efectúa una caracterización del clima, clasificándolo como "clima mediterráneo continentalizado". En cuanto a la evaporación de una lámina de agua libre, se obtienen valores anuales de 1.500 mm en Caspe y 1.700 mm en Mequinenza. La ETP de Thornthwaite se calcula en diez observatorios, alcanzando valores ligeramente superiores a los de Liso y Ascaso (1969), IAMZ (1980) y RENASA (1981). Finalmente, estiman la evapotranspiración real (ETR) utilizando la fórmula de Turc, obteniendo unos valores anuales de 350 mm en Bujaraloz, 285 mm en Caspe, 326 mm en Chiprana, 315 mm en Candanos y 339 mm en Escatrón.

Cuas y García (1990), utilizando los datos de la estación "Petris" situada en el Término Municipal de Bujaraloz, consideran que el área responde a un régimen torrencial, terminología algo ambigua que debe aplicarse a los cursos fluviales y sólo tiene una relación lateral con la clasificación climática.

Recientemente, Faci y Martínez-Cob (1991) han efectuado un estudio detallado de la evapotranspiración de referencia (ET_0) en siete estaciones meteorológicas completas de Aragón, estimada por el método FAO-USDA de Blaney-Cridde (Doorenbos y Pruitt, 1977; Allen y Pruitt, 1986) y resumen los valores de ET_0 del año medio en 66 estaciones termopluviométricas de Aragón. Los resultados de ET_0 que aportan para el área de estudio son de 1.255 mm/año en Bujaraloz, de 1.291 mm/año en Escatrón y de 1.124 mm/año en Caspe.

En la Tabla 1 se resumen las clasificaciones climáticas y agroclimáticas del área de Monegros realizadas por los distintos autores; de ellas se deduce, a pesar del uso de diferentes terminologías, una gran coincidencia en las definiciones de los regímenes térmicos y de humedad del área.

**Tabla 1. Clasificación climática del área Monegros realizada por varios autores. C= Continental, A= Arido, SA= Semiárido, T= Templado, M= Mediterráneo, Me= Mesotérmico, S= Seco.
* Clasificación Agroclimática.**

AREA MONEGROS	1	2	3*	4	5	6*	7
	C,A,T,S	SA,Me	M,S,T	C,S	SA,S	M,C,T	M,C

1: Biel y García Pedraza (1962)
2: Liso y Ascaso (1969)
3: Elías y Ruíz (1977)
4: I.A.M.Z. (1980)

5: RENASA (1981)
6: De León et al. (1987)
7: MOPU-CSIC (1989)

2.3. MATERIAL Y METODOS

En primer lugar se han recopilado, para el período 1986-1990, los datos diarios de cinco estaciones termopluviométricas (Caspe, Castejón de Monegros, Chiprana, Escatrón, y Peñalba) y de una estación pluviométrica (Bujaraloz) del Centro Meteorológico Zonal de Zaragoza (Tabla 2).

Ante la falta de información en cantidad y calidad de algunas de estas estaciones, el Servicio de Investigación Agraria (SIA) de la Diputación General de Aragón instaló en 1986 dos estaciones climáticas en Candanos y Valfarta, donde se recogen diariamente datos de precipitación, temperatura máxima y mínima, radiación solar, temperatura del suelo, velocidad y dirección del viento y evaporación del tanque clase A (Tabla 2). La ubicación y el mantenimiento de estas estaciones se efectúan, hasta donde es posible, siguiendo las recomendaciones de la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977) y del Centro Meteorológico Zonal de Zaragoza.

En las estaciones incluidas en el área de estudio (Candanos, Peñalba y Valfarta), se ha realizado un resumen del año medio con las variables registradas en cada una de ellas. El período de tiempo utilizado ha sido: Candanos, todas las variables desde Julio de 1985 a Octubre de 1991; Peñalba, precipitación desde 1969 a 1990 y temperatura desde 1969 a 1989; Valfarta, todas las variables desde Enero de 1986 a Diciembre de 1990.

Para las estaciones limítrofes (Caspe, Castejón de Monegros, Chiprana y Escatrón) se han realizado resúmenes del año medio de las variables medidas (P , T_{max} , T_{min}) y de la ET_0 estimada según el método FAO-USDA Blaney-Criddle (Doorenbos y Pruitt, 1977; Allen y Pruitt, 1986). El período de tiempo utilizado para el cálculo del año medio es el siguiente: Caspe, precipitación 1966-1990 y temperatura 1965-1990; Castejón de Monegros, todas las variables 1976-1990; Chiprana, precipitación 1979-1990 y temperatura 1986-1990; Escatrón, precipitación 1948-1990 y temperatura 1947-1990.

Asimismo, se ha realizado un análisis estadístico básico para los datos del período

Enero 1986-Octubre 1990, al objeto de comparar los resultados de esta serie de cinco años con los valores del año medio y con la estadística correspondiente a series más largas presentadas por los autores que han realizado una clasificación climática.

El análisis estadístico sólo se ha realizado para las variables P , T_{\max} , T_{\min} y ET_0 , ya que el resto de variables (HR_{\min} , n/N , U_{dia}), no se midieron en la mayor parte de las estaciones.

Para comprobar la fiabilidad de los datos de las estaciones meteorológicas y justificar el uso de los datos medios del conjunto de estaciones como sustitutivo de algún dato inexistente en la serie recopilada para determinadas estaciones, se ha realizado un análisis de regresión cruzado entre las estaciones.

Finalmente, en las inmediaciones de nueve de las dieciocho zonas endorreicas más importantes, se colocaron pluviómetros durante el período Diciembre 1988-Octubre 1990. Los pluviómetros consisten en un recipiente de plástico de 500 ml de capacidad cerrado con un tapón de caucho al que se le ha practicado una perforación por la que se introduce un embudo de plástico de sección conocida. En el embudo se colocó un papel de filtro y se protegió su parte superior con una rejilla plástica para evitar la caída de insectos, hojas etc. El conjunto bote-embudo se colocó en un recipiente cilíndrico de metal unido a una barra de 1 m de altura clavada en el suelo. El agua de los pluviómetros se recogió mensualmente (generalmente en la primera semana de cada mes) y las medidas de volumen se hicieron "in situ", trasvasando el contenido a una probeta. Del agua recogida se reservó un volumen de 250 cc para realizar análisis químicos puntuales.

Algunos de los pluviómetros fueron sustraídos en repetidas ocasiones (pluviómetros de La Playa, Amarga II y Piñol) aunque, en general, se sustituyeron dentro de los siete a quince días siguientes. A efectos de eliminar en su caso el dato correspondiente al mes de la sustracción en tratamientos posteriores, se ha comprobado con los partes pluviométricos diarios de la estación Bujaraloz "Rozas" si, durante el período en que no hubo pluviómetro, se registraron precipitaciones. Otro de los problemas planteados ha sido el de la verticalidad de los pluviómetros: los pluviómetros de Guallar y Salineta han sufrido los efectos del viento y de la acción humana, permaneciendo casi todo el período de muestreo ligeramente inclinados. Esta anomalía ha sido tenida en cuenta y ha permitido explicar la existencia de valores erráticos en el análisis de regresión cruzado.

2.3.1. Cálculo de la evapotranspiración de referencia

La evapotranspiración de referencia (ET_0) se ha calculado en las estaciones climáticas de Valfarta, Candanos, Peñalba, Castejón de Monegros, Escatrón, Chiprana y Caspe (período de 1986 a 1990) en base a la información resumida en la Tabla 2 y siguiendo el método de FAO-USDA Blaney-Criddle adaptado a las condiciones climáticas de Aragón por Faci y Martínez-Cob (1991). La ET_0 mensual se calculó a partir de la expresión (Doorenbos y Pruitt, 1977; Allen y Pruitt, 1986):

$$ET_0 = \left[a + bp(0.46T_{aj} + 8.13) \right] R_f \left[1 + \frac{E_{lv}}{10000} \right] \quad (1)$$

donde:

ET_0 = evapotranspiración de referencia media mensual (mm/día).

p = porcentaje diario de horas diurnas anuales.

a, b = coeficientes de calibración climática local.

R_f = coeficiente corrector mensual del cultivo de referencia.

T_{aj} = temperatura media mensual del aire (°C) ajustada por el índice de aridez de la estación.

E_{lv} = elevación del lugar de emplazamiento de la estación sobre el nivel del mar (m).

Los valores de la variable p se estimaron en función de la latitud de la estación y del mes, a partir de la Tabla publicada por la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977)

El valor de a se ha obtenido a partir de la ecuación:

$$a = 0.043 HR_{min} - \frac{n}{N} - 1.41 \quad (2)$$

donde:

HR_{min} = media mensual de la humedad relativa mínima diaria del aire (%).

n/N = media mensual del cociente entre insolación real diaria e insolación máxima posible diaria.

El coeficiente climático b se calculó a partir de los valores tabulados en función de las variables HR_{min} , n/N y U_{dia} , o media mensual de la velocidad diurna diaria del viento (m/s) a 2 m sobre el nivel del suelo.

El coeficiente R_f depende del mes (Allen y Pruitt, 1986): Noviembre, Diciembre, Enero, Febrero y Marzo: 1.00; Abril: 1.36; Mayo: 1.28; Junio: 1.20; Julio: 1.13; Agosto: 1.12; Septiembre: 1.21; Octubre: 1.37.

El valor de T_{aj} se calcula de:

$$T_{aj} = T_{med} - A_{ad} \quad (3)$$

donde:

T_{med} = media mensual de la temperatura media del aire (°C).

A_{ad} = factor de ajuste de la temperatura en función de la aridez de la estación (°C). Este valor se calcula a partir de:

$$A_{ad} = A_o \times I_a \quad (4)$$

donde:

A_o = efecto mensual medio de la aridez (°C).

I_a = índice de aridez de la estación (tanto por 1).

En las estaciones de Monegros, se ha considerado que el índice de aridez es 100 (debido a la elevada aridez del área Monegros).

Los datos utilizados para cada estación han sido (Tabla 2):

- Latitud del lugar de emplazamiento de la estación, en grados y fracción de grado.
- Elevación del lugar de emplazamiento de la estación sobre el nivel del mar.

- Para cada mes y año: T_{med} (media mensual de la temperatura media del aire, °C), HR_{min} (media mensual de la humedad relativa mínima diaria del aire, %), n/N (media mensual del cociente entre insolación real diaria e insolación máxima posible diaria) y $U_{día}$ (media mensual de la velocidad diurna diaria del viento a 2 m sobre el nivel del suelo).

Los valores registrados de T_{max} (media mensual de la temperatura máxima diaria del aire, °C) y T_{min} (media mensual de la temperatura media mínima diaria del aire, °C) se utilizaron para calcular los valores de T_{med} en cada estación para cada mes y año:

$$T_{med} = \frac{(T_{max} + T_{min})}{2} \quad (5)$$

Los valores registrados de n (media mensual de la insolación real diaria, horas) se utilizaron para calcular los valores de la relación n/N en la estación de Valfarta para cada mes y año, siendo N la media mensual de la insolación diaria máxima posible. Los valores de N se han obtenido de los valores tabulados (Doorenbos y Pruitt, 1977) para una latitud de 41,56°.

Los valores registrados de U_{24} (media mensual del recorrido total diario del viento, Km/día) se utilizaron para calcular los valores de $U_{día}$ en las estaciones de Valfarta y Candanos para cada mes y año.

Los valores perdidos de determinadas variables en las estaciones consideradas se han estimado con las medias para un año medio de los correspondientes meses y variables.

Estos años medios se calcularon con datos registrados durante los siguientes períodos:

- Estación de Valfarta. En todos los casos el año medio se calculó con datos de Junio de 1986 a Diciembre de 1990.

- Estación de Castejón de Monegros. El año medio se calculó con datos de Enero de 1980 a Noviembre de 1990.

- Estación de Peñalba. El año medio (para datos de T_{max} y T_{min}) se calculó con datos de Enero de 1970 a Diciembre de 1974, Enero de 1981 a Diciembre de 1984 y de Enero de 1986 a Diciembre de 1989.

- Estación de Chiprana "Torre los Baños". El año medio se calculó con datos de Enero de 1981 a Noviembre de 1990.

Las estaciones de Candanos y Escatrón están completas.

Tabla 2. Coordenadas geográficas, coordenadas UTM, elevación sobre el nivel del mar, variables meteorológicas medidas y años de registro en ocho estaciones meteorológicas de Monegros II.

ESTACION	VALFARTA	CANDASNOS	CASTEJON DE MONEGROS	CHIPRANA "Torre Los Baños"	ESCATRON	PEÑALBA	CASPE "Ayuntamiento"	BUJARALAZ "Rozas"
Longitud	0°07'53"O	0°03'19"E	0°13'56"O	0°09'19"O	0°20'54"O	0°02'26"W	0°03'43"O	0°13'56"O
Latitud ⁽¹⁾	41°33'31"N (41,56°N)	41°30'08"N (41,50°N)	41°37'20"N (41,62°N)	41°15'46"N (41,26°N)	41°17'46"N (41,30°N)	41°30'05"N (41,50°N)	41°14'36"N (41,24°N)	41°29'00"N (41,50°N)
UTM Este, Km	739.2	756.0	730.6	738.3	722.0	747.0	746.2	731.1
UTM Norte, Km	4604.7	4598.9	4611.3	4571.6	4574.8	4598.0	4569.7	4596.3
Elevación, m	340	290	466	187	143	263	122	380
Variables meteorológicas	P T _{max} T _{min} HR _{min} n U _{da}	P T _{max} T _{min} U ₂₄	P T _{max} T _{min}	P				
Años de registro	Jun.1986 a Dic.1990	Ene.1986 a Dic.1990	Ene.1986 a Nov.1990	Oct.1986 a Nov.1990	Ene.1986 a Nov.1990	Ene.1986 a Nov.1990	Ene.1986 a Nov.1990	Ene.1986 a Nov.1990

⁽¹⁾ En paréntesis se da la latitud en grados y fracción decimal de grado

Las variables meteorológicas HR_{\min} , n/N y $U_{\text{día}}$ se extrapolaron de las estaciones en que se registraron a las otras estaciones incluidas en el estudio. HR_{\min} y n/N se registraron en Valfarta y Caspe. El método de extrapolación empleado ha sido el de la inversa del cuadrado de la distancia (Isaaks y Srivastava, 1989). Las distancias entre las diferentes estaciones se calcularon a partir de sus coordenadas UTM.

La ET_0 en Bujaraloz "Rozas" se estimó, para el período Marzo 1986 a Noviembre 1990, mediante interpolación por el método de la inversa del cuadrado de la distancia (Isaaks y Srivastava, 1989). Las distancias se calcularon a partir de sus coordenadas UTM.

Los valores de ET_0 utilizados en la interpolación fueron:

- ET_0 de Valfarta, Junio 1986 a Noviembre 1990.
- ET_0 de Candanos, Enero 1986 a Noviembre 1990.
- ET_0 de Castejón de Monegros, Enero 1986 a Noviembre 1990.
- ET_0 de Escatrón, Enero 1986 a Noviembre 1990.
- ET_0 de Caspe, Enero 1986 a Noviembre 1990.
- ET_0 de Peñalba, Enero 1986 a Noviembre 1990.
- ET_0 de Chiprana, Octubre 1986 a Noviembre 1990.

Los mapas de isóneas de precipitación anual y evapotranspiración de referencia anual se confeccionaron por técnicas geoestadísticas. En primer lugar se ha calculado y modelizado el semivariograma; en el caso de la precipitación se ha utilizado un semivariograma lineal y en el de la evapotranspiración de referencia un modelo esférico sin efecto pepita. El área de búsqueda se ha dividido en cuatro sectores con un máximo de 6 puntos por sector. Los valores estimados de precipitación y ET_0 anual se han obtenido mediante krigeado ordinario puntual a través de una cuadrícula de 5 Km de lado. Las isóneas se han cartografiado con el programa SURFER, con equidistancia de 10 mm tanto en el caso de la precipitación como en el caso de la ET_0 . En ambos casos, el error promedio de las estimaciones ha sido superior a la equidistancia, pero el uso de un intervalo igual o superior al error conducía a un mapa carente de sentido por falta de isóneas.

2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 3 resume los valores mensuales del año medio histórico en cada estación y variable climática. En el Anexo 1 se presentan, para cada uno de los cinco años analizados (1986 a 1990), los datos mensuales (registrados o estimados) de P , T_{\max} , T_{\min} , HR_{\min} , n/N , $U_{\text{día}}$ y ET_0 de las estaciones utilizadas en el presente trabajo. Finalmente, la Tabla 4 presenta la estadística básica de las distintas variables climáticas recopiladas en dichas estaciones en el período 1986 a 1990.

Tabla 3. Resumen del año medio histórico de las variables climáticas: P = precipitación, T_{max} = temperatura máxima, T_{min} = temperatura mínima, U_{dia} = velocidad del viento, ET_0 = evapotranspiración de referencia.

Estación Bujaraloz "Rozas"; Elevación: 380 m; Latitud: 41.50°.

MES	P mm	ET_0 mm/día
1	31.1	0.7
2	24.6	1.3
3	8.3	2.9
4	51.0	3.1
5	53.6	4.7
6	4.0	5.4
7	17.9	5.6
8	9.4	4.9
9	38.5	3.9
10	62.1	3.0
11	30.2	1.3
12	23.3	0.8

Estación: Candanos; Elevación: 290 m; Latitud: 41.50°N.

MES	P mm	T_{max} °C	T_{min} °C	U_{dia} Km/día	ET_0 mm/día
1	23.3	8.3	-0.7	258.5	0.5
2	17.4	12.0	-0.6	285.0	1.5
3	4.2	16.3	1.7	286.2	2.7
4	40.0	17.2	4.2	302.3	3.2
5	39.9	23.6	9.3	209.0	4.5
6	31.5	27.2	14.3	263.4	5.5
7	8.4	32.6	17.0	233.8	5.7
8	25.4	32.3	17.0	218.1	5.0
9	51.8	28.4	13.7	199.1	4.0
10	59.3	21.2	9.2	197.6	3.0
11	36.7	13.5	3.2	256.3	1.4
12	20.1	8.4	-0.3	208.8	0.6

Tabla 3. (continuación)

Estación: Caspe "Ayuntamiento"; Elevación: 122 m; Latitud: 41.24°N.

MES	P mm	T _{max} °C	T _{min} °C	ET _o mm/día
1	19.9	10.7	2.3	0.8
2	18.2	14.2	3.6	1.7
3	10.6	17.3	5.8	2.7
4	29.3	20.0	8.3	3.8
5	31.3	24.3	11.6	5.0
6	27.3	29.2	16.0	5.9
7	10.1	33.3	19.1	6.6
8	14.4	32.2	18.7	5.6
9	25.1	28.5	15.9	4.3
10	46.1	23.1	11.9	3.1
11	54.7	15.2	6.5	1.6
12	11.4	10.9	3.5	0.7

Estación: Castejón de Monegros; Elevación: 466 m; Latitud: 41.62°N.

MES	P mm	T _{max} °C	T _{min} °C	ET _o mm/día
1	23.5	7.4	3.1	0.5
2	30.2	9.0	4.3	1.6
3	15.7	11.8	6.1	2.9
4	40.3	14.7	8.1	3.2
5	52.3	18.2	11.1	4.4
6	28.7	22.9	16.0	5.0
7	9.2	27.8	19.3	5.3
8	37.3	26.9	19.0	4.8
9	31.6	23.7	17.2	4.0
10	41.4	17.3	11.9	3.0
11	55.6	11.1	6.9	1.3
12	18.9	7.6	4.2	0.9

Tabla 3. (continuación)

Estación: Chiprana "Torre Los Baños"; Elevación: 187 m; Latitud: 41.26°N.

MES	P mm	T _{max} °C	T _{min} °C	ET _o mm/día
1	19.1	8.4	0.9	0.6
2	20.9	14.9	3.5	1.7
3	11.3	18.9	6.2	2.8
4	30.4	20.1	7.9	3.9
5	36.8	25.9	11.2	4.9
6	31.5	31.1	16.3	6.2
7	16.7	35.1	19.1	6.7
8	19.5	34.9	20.6	5.9
9	23.8	30.3	17.0	4.4
10	41.9	22.8	12.5	3.2
11	42.8	16.1	6.4	1.5
12	10.3	10.3	2.6	0.7

Estación: Escatrón; Elevación: 143 m; Latitud: 41.30°N.

MES	P mm	T _{max} °C	T _{min} °C	ET _o mm/día
1	25.4	10.1	2.1	0.8
2	22.7	14.2	3.1	1.7
3	11.5	18.1	5.1	2.9
4	45.1	20.4	7.5	3.7
5	53.8	26.8	11.4	4.9
6	30.3	31.0	15.7	5.7
7	10.6	35.5	18.8	6.1
8	8.0	35.3	18.6	5.2
9	32.1	30.8	15.5	4.0
10	58.3	23.2	10.8	3.2
11	38.4	15.4	5.8	1.5
12	18.9	10.7	3.2	0.8

Tabla 3. (continuación)

Estación: Peñalba; Elevación: 263 m; Latitud: 41.50°N.

MES	P mm	T _{max} °C	T _{min} °C	ET _o mm/día
1	16.7	10.9	-1.4	0.4
2	24.5	13.9	-1.5	1.4
3	17.2	19.0	2.3	3.0
4	32.6	23.6	5.4	3.7
5	39.9	26.0	8.6	4.4
6	25.5	30.4	12.6	5.3
7	13.4	36.2	15.8	5.7
8	16.6	37.3	16.0	5.2
9	18.1	31.2	11.5	4.0
10	40.3	25.1	6.7	3.1
11	41.0	17.6	2.2	1.4
12	18.3	11.2	-0.4	0.7

Estación: Valfarta; Elevación: 340 m; Latitud: 41.56°N.

MES	P mm	T _{max} °C	T _{min} °C	HRmin %	n/N	U _{día} Km/día	ET _o mm/día
1	21.3	9.3	0.9	66.9	3.0	197.8	0.5
2	17.1	13.9	2.0	46.0	5.4	278.7	1.8
3	3.9	17.5	3.8	34.9	6.5	296.4	3.1
4	51.4	18.3	6.0	42.0	5.1	293.1	3.4
5	54.1	24.1	9.4	34.2	6.2	202.9	4.5
6	33.1	28.0	13.0	32.9	6.5	238.8	5.3
7	11.4	32.2	15.9	30.0	7.2	213.4	5.4
8	23.9	32.3	16.1	33.1	7.6	210.6	4.8
9	43.5	28.2	13.6	34.1	6.4	169.1	3.9
10	50.0	21.4	8.8	39.9	4.9	196.7	3.0
11	37.9	13.6	5.0	54.6	4.2	227.5	1.4
12	17.4	10.4	1.7	51.6	3.2	224.8	0.9

Tabla 4. Estadística básica (media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación) de los datos climáticos correspondientes al período 1986-1990 de las estaciones analizadas en el área Monegros.

ESTACION	P mm/mes			T _{max} °C			T _{min} °C			ET ₀ mm/día		
	x	σ_{n-1}	CV(%)	x	σ_{n-1}	CV(%)	x	σ_{n-1}	CV(%)	x	σ_{n-1}	CV(%)
BUJARALAZ	33.9	33.5	99	-	-	-	-	-	-	3.2	1.7	54
CANDASNOS	32.0	30.0	94	19.9	8.5	42	7.4	6.8	91	3.1	1.8	57
CASPE	29.3	29.2	99	21.9	8.0	36	10.5	6.1	57	3.5	2.0	56
CASTEJON DE MONEGROS	31.7	27.0	85	17.0	7.3	42	10.3	6.0	56	3.1	11.6	51
CHIPRANA	29.1	27.2	93	22.5	8.3	37	10.4	6.1	59	3.5	2.0	56
ESCATRON	31.6	34.0	107	22.8	8.7	38	10.1	5.9	58	3.4	1.8	52
PEÑALBA	28.0	26.2	94	23.1	9.4	40	5.9	6.1	103	3.2	1.7	54
VALFARTA	30.5	30.0	98	21.1	8.1	38	8.3	5.6	67	3.2	1.6	52

2.4.1. Precipitación

Los valores del año medio histórico (Tabla 3) indican que las mayores precipitaciones se alcanzan en Castejón de Monegros (385 mm) y Valfarta (365 mm), y las menores en Caspe (298 mm), Chiprana (305 mm) y Peñalba (304 mm). Esto es, los valores de P tienden a aumentar ligeramente desde el río Ebro (Caspe y Chiprana) hacia el norte de Monegros II (Castejón de Monegros y Valfarta) tal como sugiere el mapa de isoyetas (Figura 2a). De cualquier forma, la variabilidad espacial de la P es escasa, tal como indica el bajo valor del coeficiente de variación ($CV = 10\%$) de la P media de las ocho estaciones. A nivel mensual (Figura 3), las P históricas más bajas se obtienen en Valfarta (3.9 mm, en Marzo) y las más altas en Bujaraloz (62.1 mm, en Octubre), lo que indica que la variabilidad espacial e intermensual de las mismas es, por el contrario, elevada.

La Figura 1 presenta, para las seis estaciones más relevantes del área de estudio, la P anual y la media del período 1986-1990. La P media anual de las ocho estaciones es de 350 mm, y la de las seis estaciones de la Figura 1 es de 357 mm (P máxima de 392 mm en Bujaraloz y mínima de 280 mm en Chiprana); esto es, ligeramente superiores a la P media histórica, que es de 341 mm. Los respectivos CV son inferiores al 10%, lo que indica que la variabilidad espacial de la P anual del período estudiado es, asimismo, escasa. Así, el mapa de isolíneas de la P anual (en el que se han incluido las P medidas en los pluviómetros instalados por el SIA) permite apreciar (Figura 2b) su escasa variabilidad espacial, aunque parece observarse de nuevo un ligero incremento de la misma en la dirección Norte. Este mapa sólo debe tomarse como orientativo, ya que la densidad de muestreo no es homogénea, lo que explica el mayor número de isolíneas en torno a las áreas (lagunas) con mayor densidad de puntos, en las que se instalaron los pluviómetros a partir de Diciembre de 1988.

La Figura 1 indica que las P anuales en las distintas estaciones han oscilado entre valores inferiores a 500 mm y superiores a 250 mm. Estos resultados coinciden, en general, con las P anuales del año medio histórico y con los valores presentados para las estaciones del área por Elías y Ruiz (1977), IAMZ (1980) y Faci y Martínez-Cob (1990) (datos no presentados).

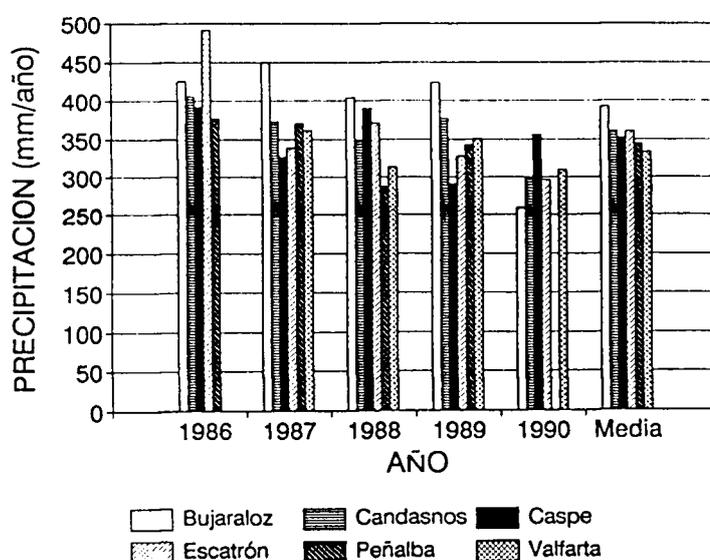
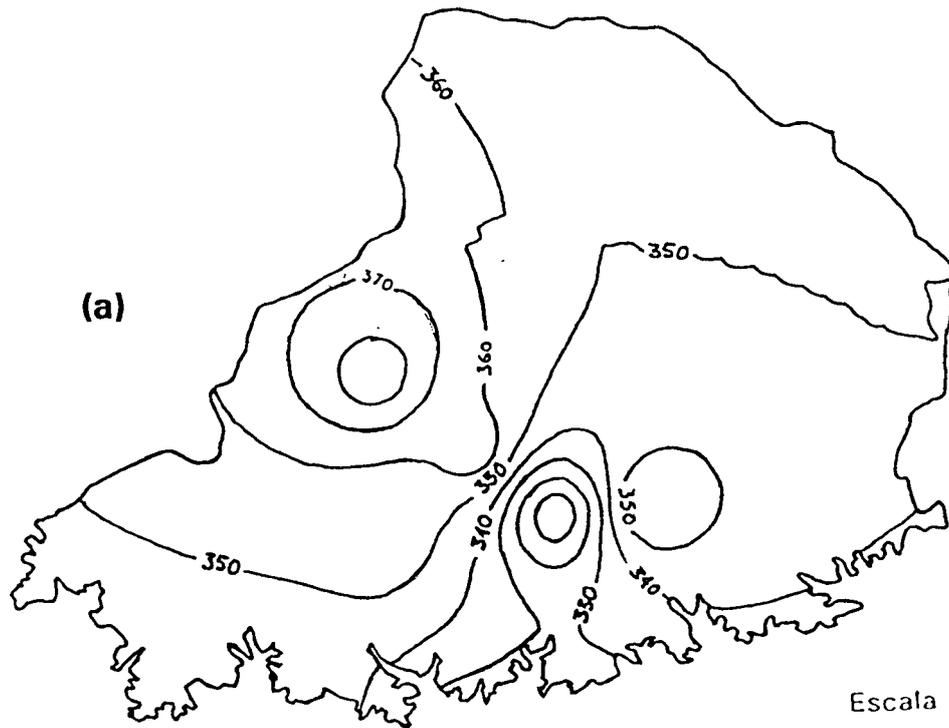
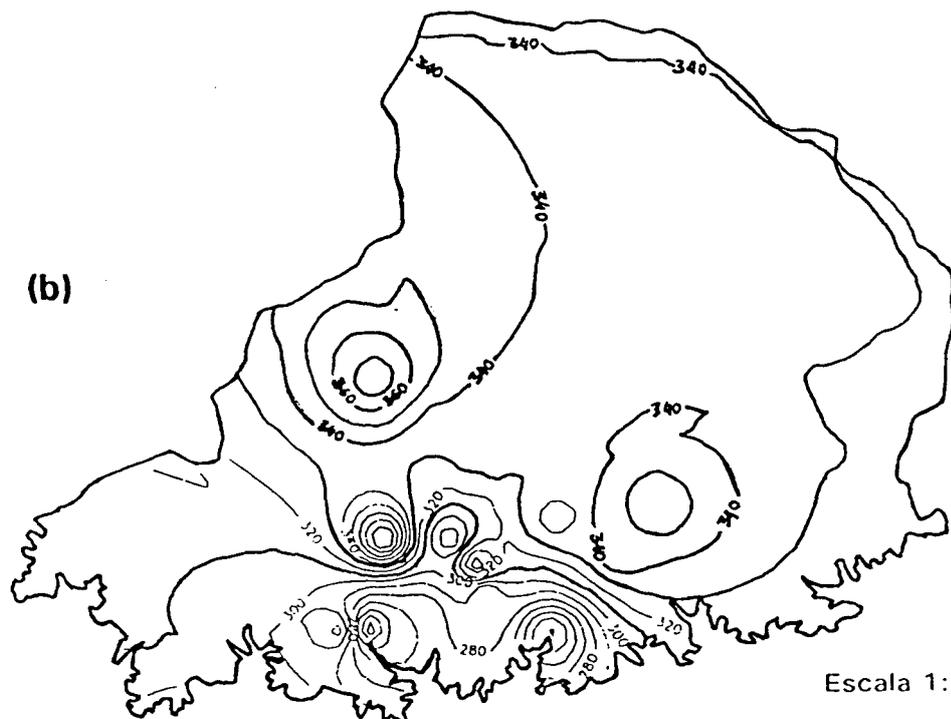


Figura 1. Precipitación anual en seis estaciones climáticas y media del conjunto para el período 1986 - 1990.



Escala 1:715.000



Escala 1:715.000

Figura 2. Distribución espacial de la precipitación anual (a) del año medio histórico en ocho estaciones climáticas y (b) del año medio del período 86-90 en ocho estaciones climáticas y nueve pluviómetros situados en las cubetas endorreicas.

El análisis de estadística básica (Tabla 4) indica una similitud entre estaciones de las P medias del período 1986-1990. Así, dichas precipitaciones varían entre 28 (Peñalba) y 34 (Bujaraloz) mm/mes, aunque sus coeficientes de variación son elevados debido a la concentración de las lluvias en dos períodos típicos del año. Asimismo, la distribución de la precipitación mensual del año medio histórico (Figura 3) indica que, en general, los meses más lluviosos son Octubre, Noviembre, Abril y Mayo, en los que la P acumulada supone el 70 % del total anual. En líneas generales, las precipitaciones en primavera son menos intensas que en otoño, donde el número de días de lluvia por mes es mayor.

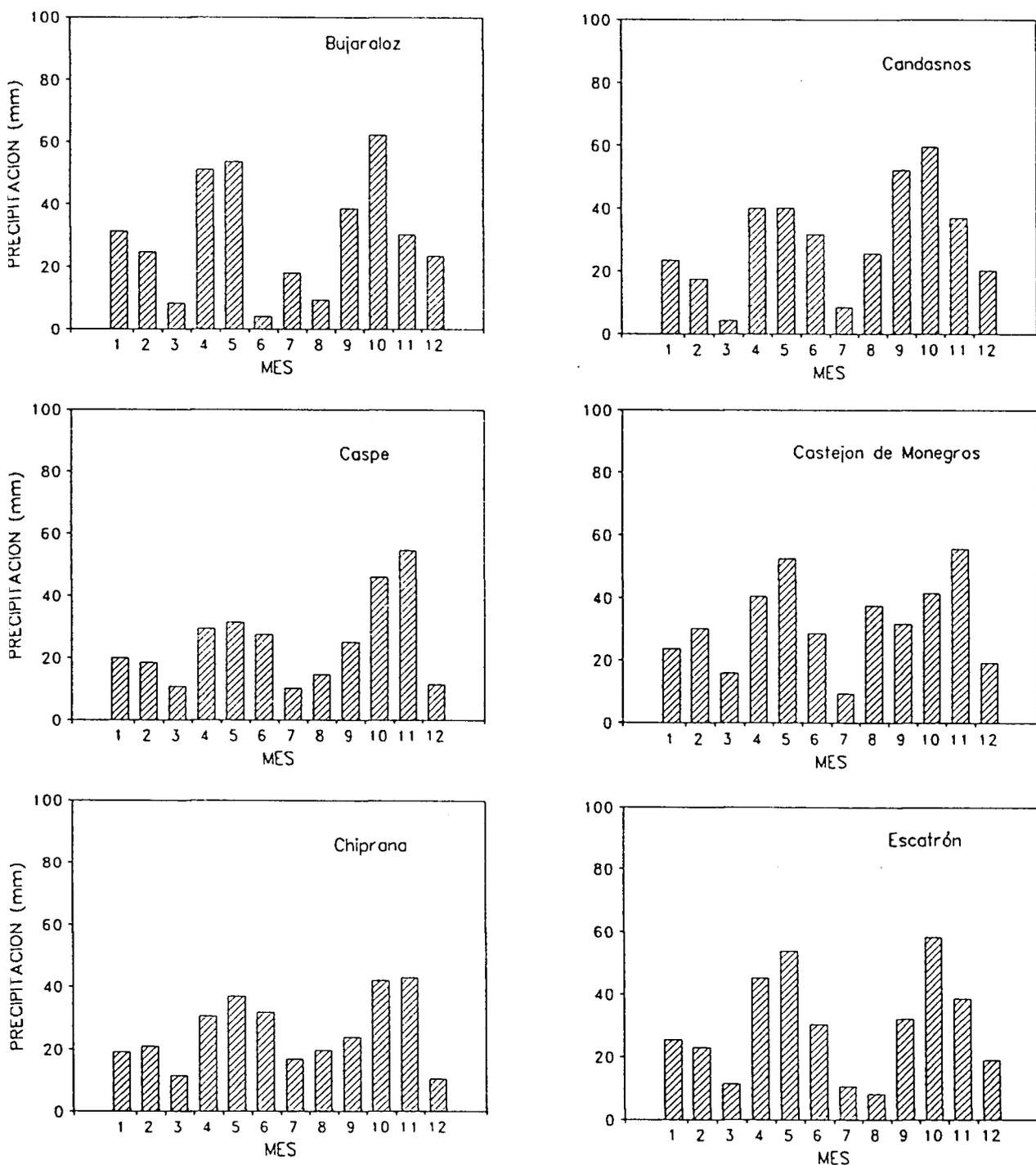


Figura 3. Distribución de la precipitación mensual (mm) del año medio histórico en las ocho estaciones del área de estudio

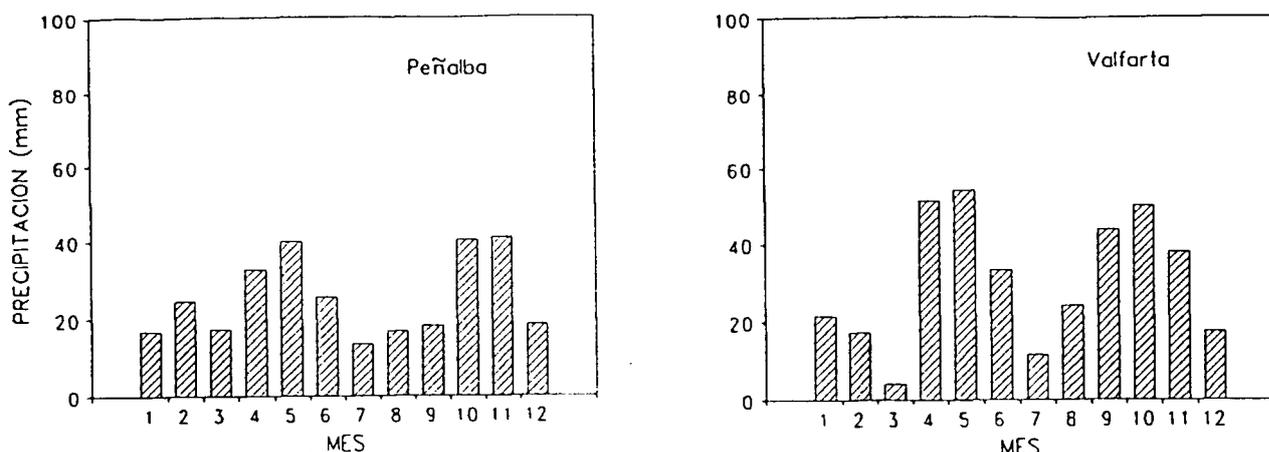


Figura 3. (continuación)

En el Anexo 1 figuran las precipitaciones recogidas mensualmente desde Diciembre de 1988 hasta Octubre de 1990 en los pluviómetros instalados junto a las lagunas, y en la Tabla 5 se presentan la media, desviación estándar y CV de los valores medios mensuales de la precipitación recogida en esta red de pluviómetros y en las cuatro estaciones localizadas dentro del área de estudio. De este Anexo y Tabla puede concluirse, en contraste con las precipitaciones anuales, que la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones mensuales medidas en dicho período es muy elevada.

Tabla 5. Precipitación media mensual (pluviómetros junto a lagunas y estaciones de Bujaraloz, Candasnos, Peñalba y Valfarta) en el área de estudio durante el período Diciembre 1988 - Octubre 1990.

FECHA	P (mm/mes)			FECHA	P (mm/mes)		
	\bar{x}	σ_{n-1}	CV (%)		\bar{x}	σ_{n-1}	CV (%)
12-88	2.6	2.1	80	11-89	70.8	17.6	25
1-89	8.6	3.4	39	12-89	17.2	6.9	40
2-89	4.0	1.5	37	1-90	7.4	2.8	38
3-89	38.7	4.7	12	2-90	1.9	1.4	73
4-89	43.7	10.4	24	3-90	14.7	7.0	48
5-89	18.0	9.1	50	4-90	36.2	17.6	49
6-89	11.4	11.9	104	5-90	48.4	24.2	50
7-89	11.9	5.4	45	6-90	27.6	63.7	231
8-89	38.4	12.0	31	7-90	17.5	2.5	14
9-89	45.0	25.3	56	8-90	0.8	1.1	137
10-89	4.7	8.5	181	9-90	27.5	21.4	78.4

El análisis de regresión lineal que se presenta en la Tabla 6 muestra que la correlación entre las P mensuales registradas en las estaciones de Valfarta, Candasnos y Bujaraloz son significativas al 1%. Esto es, existe una estrecha correspondencia entre las tres estaciones, aunque las pendientes inferiores a la unidad indican que los valores de P

son diferentes. Las elevadas correlaciones obtenidas permiten estimar los valores perdidos en algunas estaciones a partir de los valores correspondientes de estaciones con medida de la P.

Tabla 6. Ecuaciones de regresión lineal ($Y = a + bX$) entre las precipitaciones mensuales medidas en las estaciones climáticas del área de estudio (V = Valfarta; C = Candasnos; B = Bujaraloz).

X-Y	a	b	r	n
V-C	10.32	0.73	0.86***	23
V-B	14.62	0.60	0.78**	13
C-B	13.07	0.61	0.75**	13

***, ** Significativo al 0.1 y al 1 %, respectivamente

El análisis de regresión lineal entre las precipitaciones mensuales registradas en los pluviómetros de las lagunas y las estaciones de Bujaraloz, Candasnos y Valfarta se presenta en la Tabla 7. Tal como era de esperar, las correlaciones más elevadas se obtienen con Bujaraloz, ya que es la estación más próxima a los pluviómetros. Por otro lado, si se elimina el dato correspondiente a Junio de 1990, mes en el que en los pluviómetros instalados no se recogió agua mientras que en las estaciones meteorológicas se recogió una cantidad apreciable, los coeficientes de determinación que se obtienen con las estaciones de Valfarta y Candasnos mejoran en todos los casos, excepto con los pluviómetros instalados en las lagunas de Guallar y Piñol.

La razón de esta falta de correlación debe atribuirse, en el caso del pluviómetro de Guallar, a la ya mencionada inclinación del mismo que hace que la precipitación recogida sea siempre algo menor. Por otro lado, el pluviómetro de Piñol ha sido sustraído en tres ocasiones, y en dos de los períodos se registraron precipitaciones en el área. Ambas circunstancias pueden explicar los valores dispares de estos dos puntos con el resto de las estaciones.

En general existe una correlación significativa al 1 % entre las pluviometrías. El hecho de que las pendientes de estas regresiones sean inferiores a la unidad (esto es, las P medidas en los pluviómetros son inferiores a las medidas en las estaciones) carece en este caso de una significación especial, ya que puede ser debido a la forma y borde superior romo de los pluviómetros, así como a la posible evaporación parcial de agua en los mismos.

Tabla 7. Ecuaciones de regresión lineal ($Y = a + bX$) entre las precipitaciones mensuales medidas en las estaciones climáticas de Valfarta, Candasnos y Bujaraloz, y las precipitaciones mensuales medidas en los pluviómetros instalados en las diferentes lagunas.

Y	X											
	VALFARTA				BUJARALAZ				CANDASNOS			
	a	b	R ²	n	a	b	R ²	n	a	b	R ²	n
AGUSTIN	12.68	0.40	0.34**	18	0.95	0.68	0.47*	11	13.89	0.29	0.24NS	18
AMARGA	16.38	0.38	0.41**	15	3.09	0.62	0.78**	9	15.57	0.36	0.49**	15
BENAMUD	14.38	0.37	0.37**	18	5.36	0.49	0.52*	11	13.36	0.35	0.44**	18
CAMARON	10.74	0.58	0.60**	18	5.87	0.73	0.58**	11	13.91	0.42	0.44**	18
GUALLAR	13.36	0.21	0.15NS	15	0.55	0.68	0.75**	9	19.12	0.11	0.05NS	15
PIÑOL	16.74	0.30	0.17NS	17	-7.08	0.77	0.76**	10	16.26	0.27	0.18NS	17
PLAYA	16.38	0.46	0.48**	17	0.74	0.72	0.67**	11	13.88	0.39	0.44**	17
SALINETA	17.69	0.46	0.37**	15	7.53	0.61	0.41NS	8	18.10	0.36	0.23NS	15
VALCUERNA	10.87	0.49	0.39**	20	-1.72	0.93	0.65**	13	11.15	0.40	0.36*	20

***, **, *: Significativo al 0.1, 1 y 5%, respectivamente.

Finalmente, las correlaciones entre las precipitaciones mensuales registradas en los pluviómetros de las lagunas se presentan en la Tabla 8. Destacan los bajos coeficientes de determinación de casi todos los pluviómetros con el instalado en Valcuerna, posiblemente debido a su ubicación. Asimismo, el pluviómetro situado junto a la laguna de Guallar presenta bajos coeficientes de determinación, debido posiblemente a su ligera pero persistente inclinación producida por el viento. En general, el resto de las correlaciones presentan coeficientes de determinación elevados (significativos al menos al 1%).

Tabla 8. Coeficientes de determinación de las regresiones lineales efectuadas entre las precipitaciones mensuales recogidas en los pluviómetros de las lagunas.

	AGUSTIN	AMARGA-I	BENAMUD	CAMARON	GUALLAR	PIÑOL	PLAYA	SALINETA
AGUSTIN								
AMARGA-I	0.75***							
BENAMUD	0.74***	0.91***						
CAMARON	0.81***	0.87***	0.82***					
GUALLAR	0.50*	0.55**	0.39 NS	0.56**				
PIÑOL	0.43*	0.78***	0.69***	0.63**	0.68***	1		
PLAYA	0.69***	0.93***	0.87***	0.88***	0.70***	0.87***		
SALINETA	0.89***	0.89***	0.88***	0.92***	0.65**	0.57**	0.89***	
VALCUERNA	0.65***	0.51*	0.38 NS	0.38 NS	0.38 NS	0.16NS	0.44*	0.61**

***, **, *: Significativo al 0.1, 1 y 5 %, respectivamente.
NS: No significativo.

2.4.2. Temperatura

La Tabla 3 resume los valores de temperatura máxima media mensual del año medio histórico en las distintas estaciones del área de estudio. En general, la distribución de la temperatura máxima media mensual a lo largo del año (Figura 4) es similar en todas las estaciones, alcanzándose los valores más elevados en Julio (valor medio de las estaciones igual a 33.3°C) y los más bajos en Enero (valor medio igual a 9.3°C). Los CV de estos valores medios son del 8 y 14%, respectivamente, indicando que la variabilidad espacial es escasa. En el Anexo 1 se resumen las temperaturas máximas medias mensuales de cada uno de los años de 1986 a 1990. Puede observarse que, en general, los valores obtenidos son similares a los del año medio histórico. La temperatura media de las máximas del período 86-90 oscila entre 17.0 (Castejón de Monegros) y 23.1 °C (Peñalba) (Tabla 4).

La Tabla 3 resume los valores de temperatura mínima media mensual del año medio histórico en las distintas estaciones del área de estudio. En general, la distribución de la temperatura mínima media mensual a lo largo del año (Figura 5) es similar en todas las estaciones, alcanzándose los valores más elevados en Julio (valor medio de las estaciones igual a 17.9°C) y los más bajos en Enero (valor medio igual a 1.0°C). Los CV de estos valores medios indican, asimismo, que la variabilidad espacial es escasa. En el Anexo 1 se resumen las temperaturas mínimas medias mensuales de cada uno de los años de 1986 a 1990. Puede observarse que, en general, los valores obtenidos son similares a los del año medio histórico. La temperatura media de las mínimas del período 86-90 oscila entre 10.5°C (Caspe) y 5.9 °C (Peñalba) (Tabla 4).

De estos resultados puede concluirse que el régimen de temperaturas corresponde a un clima de tipo continental, con valores extremos en invierno y verano claramente diferenciados y con una variabilidad espacial poco acusada.

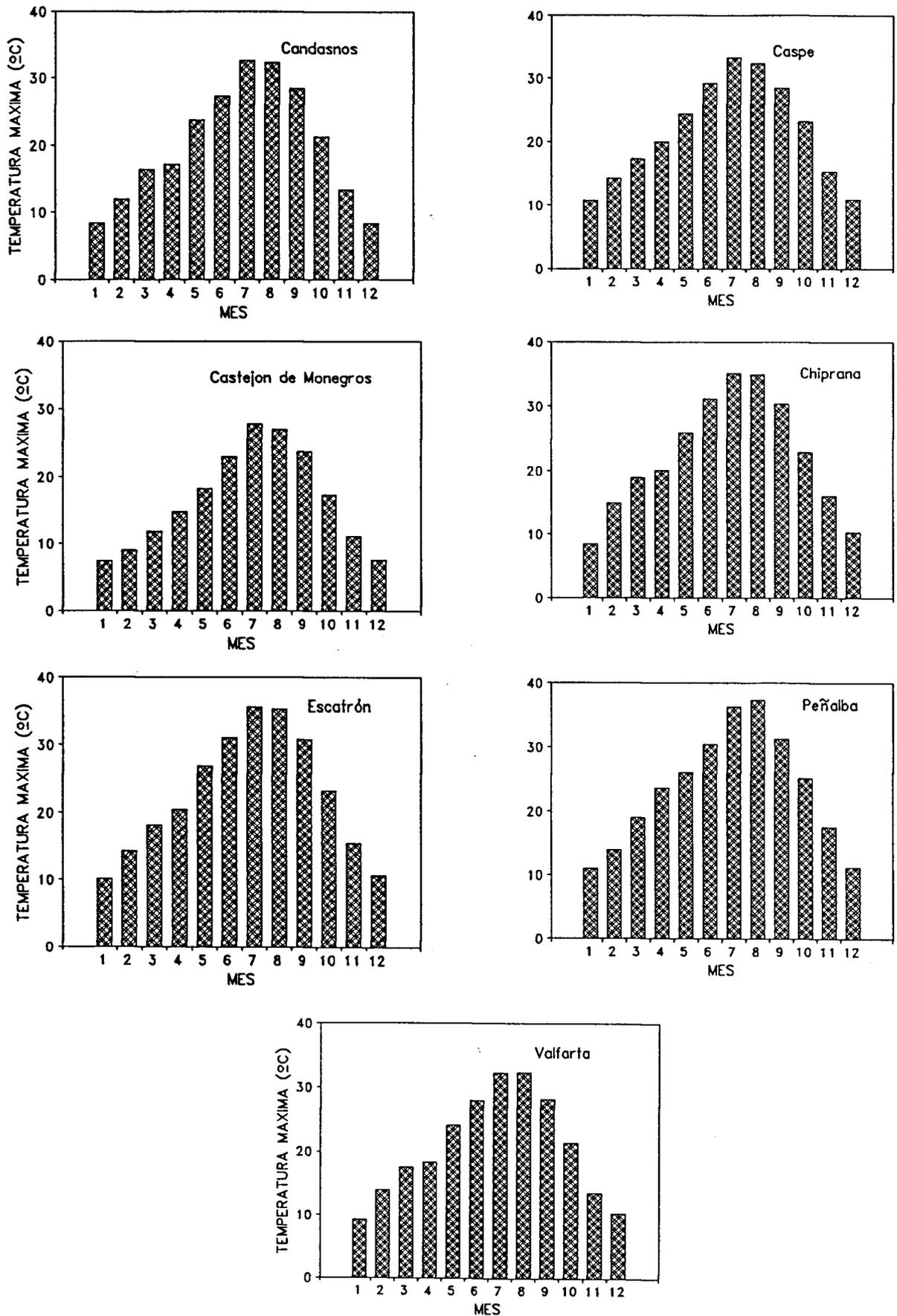


Figura 4. Distribución de la temperatura máxima media mensual (°C) del año medio histórico en las ocho estaciones del área de estudio.

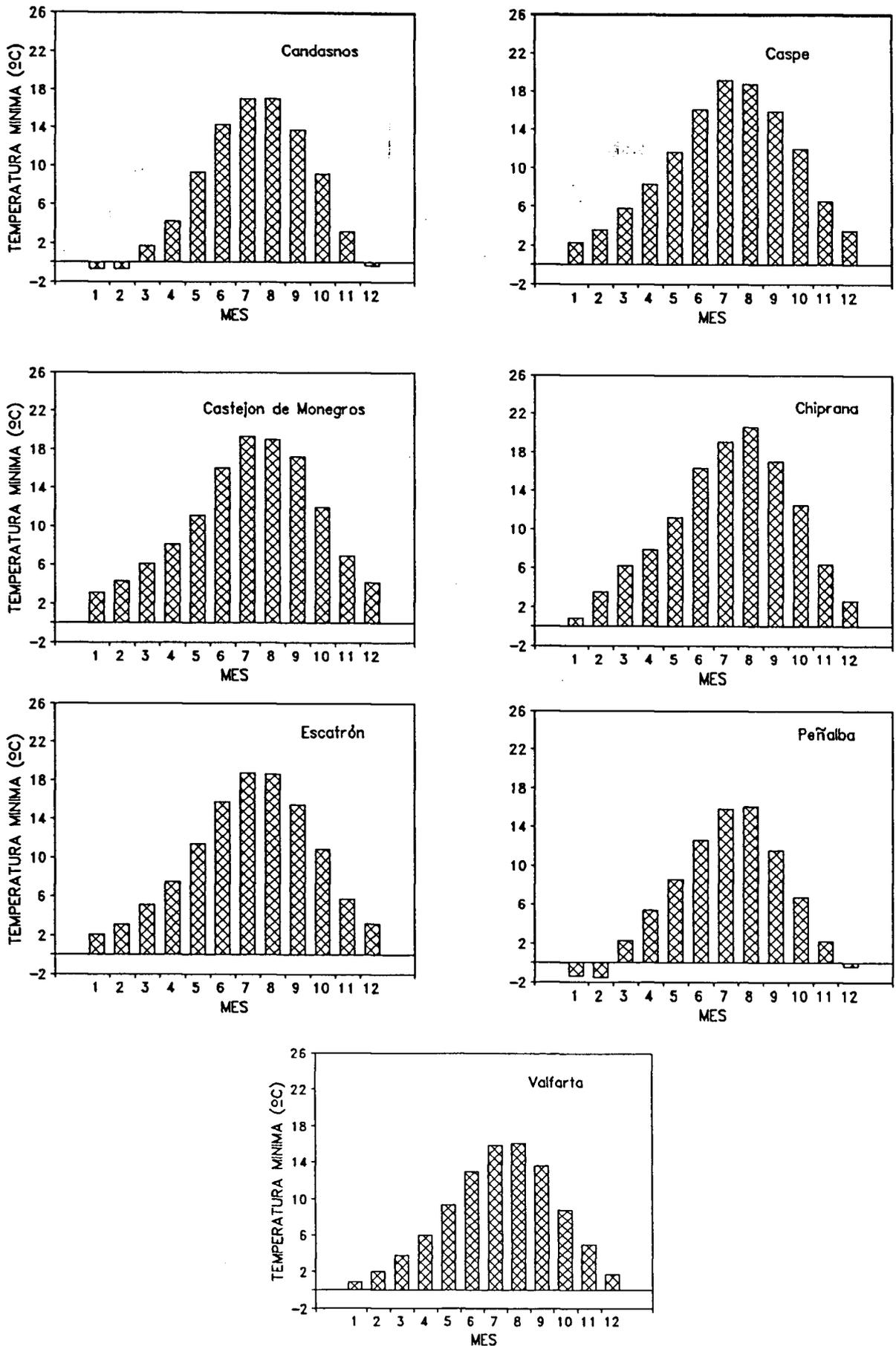


Figura 5. Distribución de la temperatura mínima media mensual (°C) del año medio histórico en las ocho estaciones del área de estudio.

2.4.3. Velocidad del viento

El estudio de esta variable se ha realizado a partir de los datos de los medidores de recorrido del viento instalados en Candanos y Valfarta. Los valores medios mensuales obtenidos oscilan entre 169 y 302 Km/día (Tabla 3). La distribución mensual de esta variable muestra valores máximos en primavera (en torno a los 295 Km/día) y mínimos en otoño (en torno a los 195 Km/día) (Figura 6). Aun así, la variabilidad intermensual no es muy elevada, ya que el CV del valor medio de la velocidad del viento es del 15% en Candanos y del 18% en Valfarta. La velocidad del viento es ligeramente superior en Candanos (media anual de 243 Km/día) que en Valfarta (media anual de 229 Km/día).

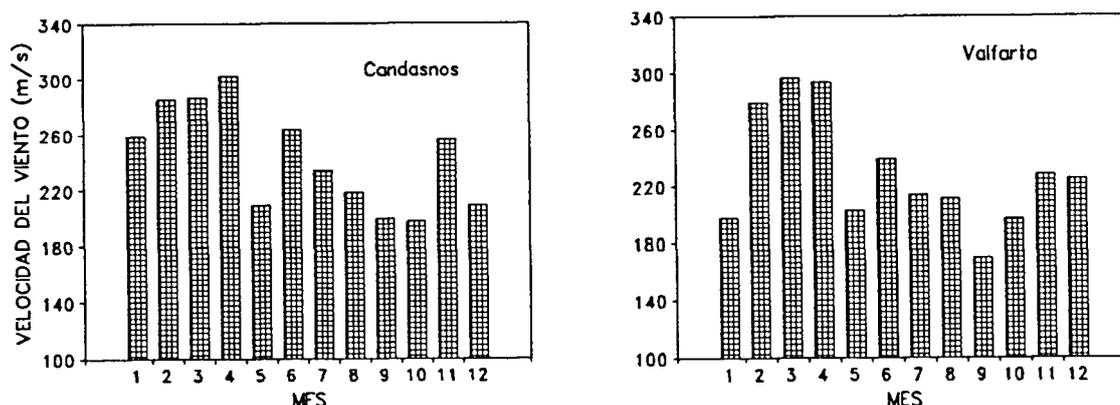


Figura 6. Distribución de la velocidad mensual del viento (Km/día) en (1) Candanos y en (2) Valfarta.

2.4.4. Evapotranspiración de referencia

El cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0) se ha realizado fundamentalmente para su inclusión en los balances hídricos realizados en el área de estudio. La ET_0 media mensual (mm/día) de las distintas estaciones climáticas se presenta en el Anexo 1 y las medias mensuales del año medio histórico y del período 1986-1990 se presentan en las Tablas 3 y 4, respectivamente.

La ET_0 anual del año medio histórico ha variado entre un mínimo de 1.125 mm/año en Castejón de Monegros y un máximo de 1.296 mm/año en Chiprana. El valor medio del conjunto de estaciones es de 1.182 mm/año, y su CV es del 5%, lo que indica que el área de estudio es muy homogénea desde el punto de vista de esta variable climática.

Los valores máximos de la ET_0 media mensual del año medio histórico se dan en el mes de Julio, con unos valores de 6.7 mm/día en Chiprana y 6.6 mm/día en Caspe, y los valores mínimos en el mes de Enero, con valores comprendidos entre 0.4 y 0.8 mm/día. En general, los valores mínimos se producen en los meses de invierno y los máximos en los meses de verano. La Figura 7 indica que esta distribución es común a todas las estaciones, indicando que la variabilidad espacial de esta variable es escasa.

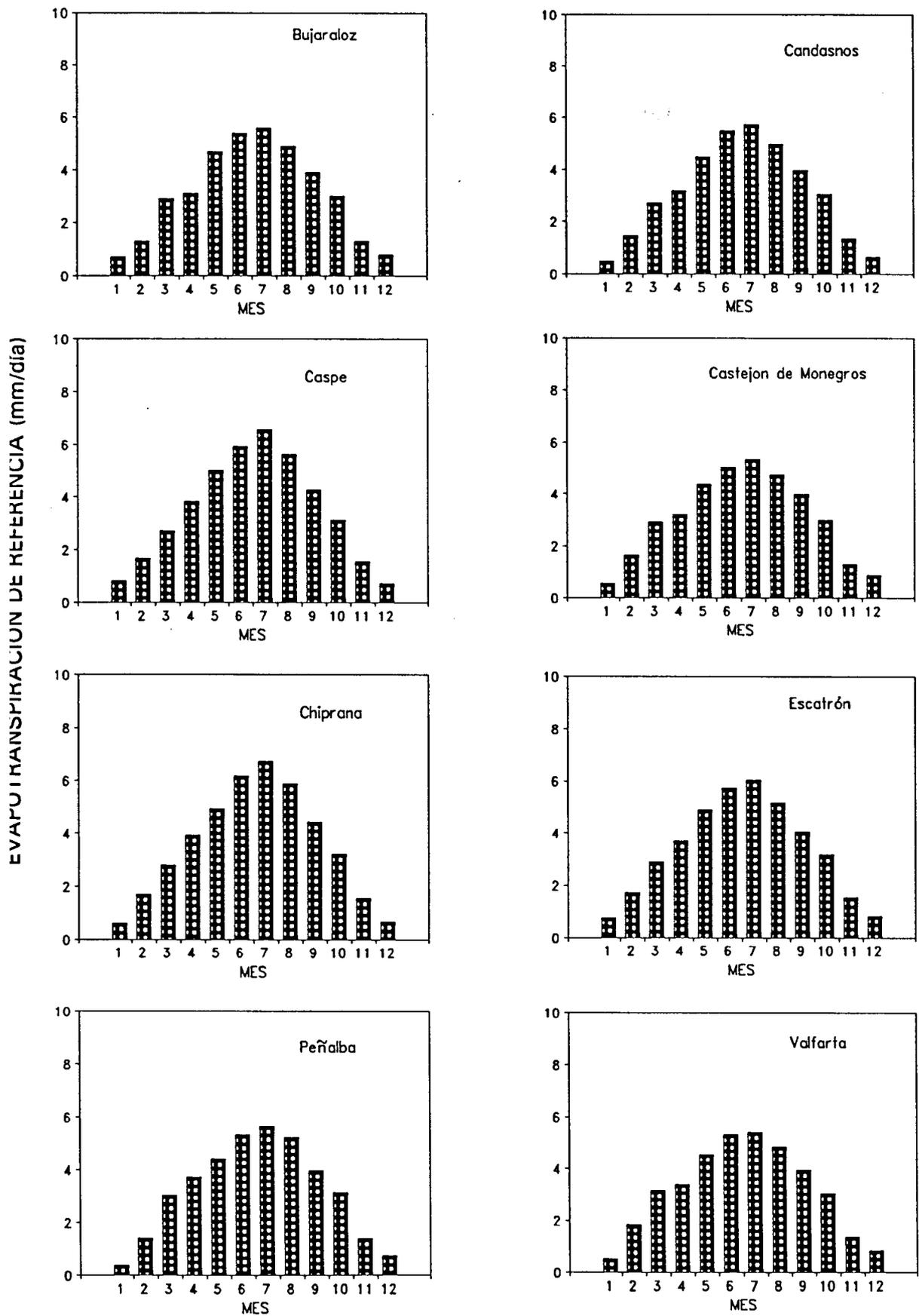


Figura 7. Distribución de la ET_0 mensual (mm/día) del año medio histórico en las ocho estaciones climáticas del área de estudio.

Los valores obtenidos durante el período de estudio 1986 a 1990 son similares a los históricos. La ET_0 media anual varía entre 3.1 mm/día (Candasnos y Castejón de Monegros) y 3.5 mm/día (Caspe y Chiprana) (Tabla 4). La Figura 8 presenta el mapa de isólinas de la ET_0 anual del año medio de dicho período (mm/año), dibujado con un intervalo entre líneas de 10 mm. Puede apreciarse que la variabilidad espacial de la ET_0 no es importante, aunque se aprecia un ligero descenso de la misma hacia el NE. Este descenso no es sin embargo significativo, puesto que el error promedio de la estimación (69 mm) ha sido más elevado que el intervalo con el que se han dibujado las isólinas. Todo ello es indicativo de la homogeneidad de la evapotranspiración de referencia anual.

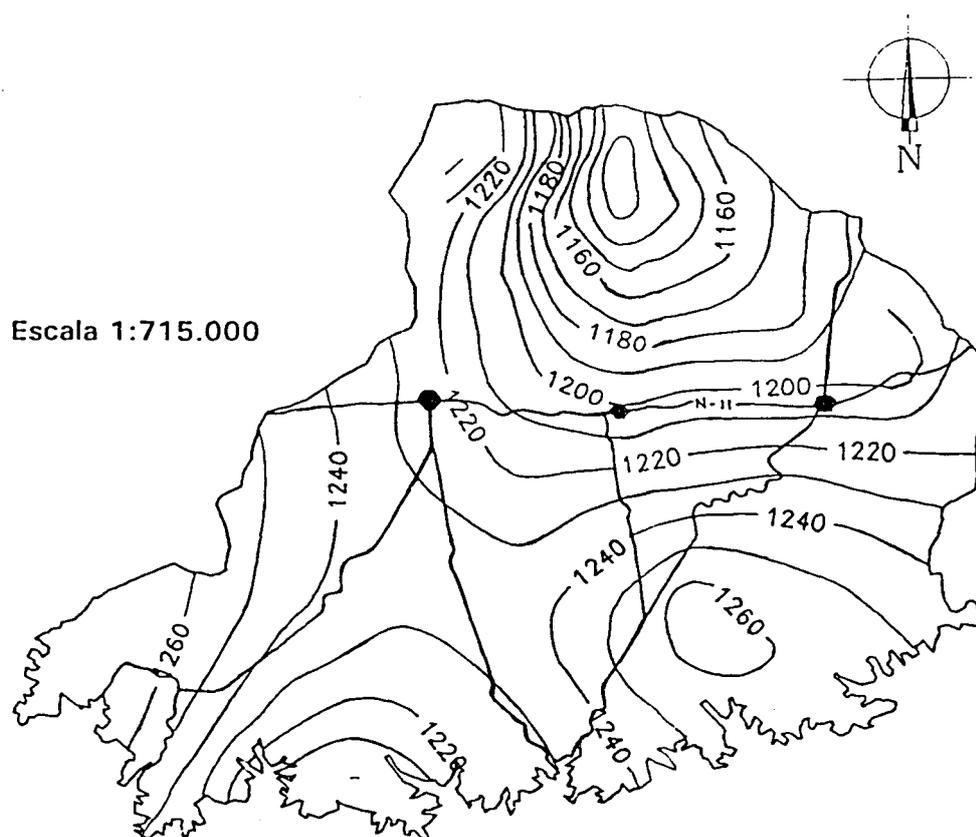


Figura 8. Distribución espacial de la ET_0 anual media (mm) del período 1986-1990.

2.4.5. Evaporación en tanque clase "A"

Los resultados obtenidos en Valfarta y Candasnos, únicas estaciones de la zona de estudio que tienen un tanque clase A, se presentan en la Tabla 9. A partir de esta información, se han calculado los datos de evaporación media mensual del año medio del período 1986 a 1990 que figuran en la Tabla 10. Finalmente, se ha efectuado un análisis de la distribución mensual de la evaporación en ambas estaciones, que se presenta en la Figura 9.

Comparando los resultados obtenidos en Valfarta y Candasnos durante el período 1986-90, se observa que la evaporación es sistemáticamente mayor en Candasnos, excepto en el mes de Mayo de 1990. Así, la evaporación anual del año medio en Candasnos (2.044 mm) es un 30% superior a la de Valfarta (1.570 mm). Ello es debido fundamentalmente a la distinta ubicación del tanque clase "A" en ambas estaciones: en Candasnos el tanque clase "A" estuvo sobre suelo desnudo y rodeado de rastrojo y cultivo de cereal de secano, mientras que en Valfarta estuvo rodeado de una pradera de festuca regada de 10 x 10 m de superficie junto a los sectores de riego por aspersión de la finca experimental de riegos de Valfarta de la D.G.A. Ello significa que la información generada en Candasnos es más apropiada para efectuar balances hídricos en la situación actual de secano, en tanto que los datos obtenidos en Valfarta son más apropiados para estimar las necesidades hídricas de los cultivos bajo la situación futura de regadío.

La variabilidad intermensual de la evaporación es muy elevada, alcanzándose los valores máximos en Julio (promedio de las dos estaciones igual a 9.8 mm/día) y los mínimos en Enero (promedio igual a 1.3 mm/día). Esta variabilidad intermensual es coherente con la deducida para el resto de variables climáticas.

Tabla 9. Evaporación media de cada mes y año del período 1986 a 1990 medida en los tanques clase A de las estaciones climáticas de Candasnos (CAN) y Valfarta (VAL).

MES	1986		1987		1988		1989		1990	
	CAN	VAL	CAN	VAL	CAN	VAL	CAN	VAL	CAN	VAL
mm/día										
1	2.7		2.0	1.4	1.5	1.4	1.1	0.3	0.9	0.6
2	2.2		2.6	2.8	2.5	2.0	5.1	1.5	3.1	2.7
3	4.3		3.8	3.7	6.2	5.5	5.0	5.2	5.5	3.2
4	5.3		5.6	3.9	3.9	3.2	5.8	4.3	5.8	4.2
5	7.8		7.6	6.9	5.8	5.0	7.4	6.5	7.5	6.5
6	12.0	10.5	10.0	8.0	6.6	7.1	11.7	9.4	9.0	5.7
7	11.7	8.6	10.0	7.3	10.9	9.0	12.1	9.0	11.4	7.8
8	10.3	7.8	9.9	8.6	11.2	9.7	8.9	6.2	9.0	6.7
9	5.8	4.8	6.7	5.8	7.8	6.2	4.7	3.7	6.5	4.7
10	3.5	2.8	3.3	2.1	4.0	3.1	3.9	2.7	3.5	1.6
11	1.6	1.1	2.0	1.9	1.6	1.3	2.2	1.4	1.9	1.1
12	2.2	1.3	0.6	0.6	3.3	2.1	0.9	0.5	2.3	1.1

Tabla 10. Evaporación media mensual (mm/día) del tanque clase A en las estaciones de Candasnos y Valfarta para el año medio del período 1986-1990.

MES	CANDASNOS	VALFARTA
1	1.67	0.92
2	3.11	2.25
3	4.99	4.40
4	5.29	3.90
5	7.23	6.23
6	9.86	8.14
7	11.22	8.34
8	9.86	7.80
9	6.32	5.04
10	3.64	2.46
11	1.86	1.36
12	1.88	1.12

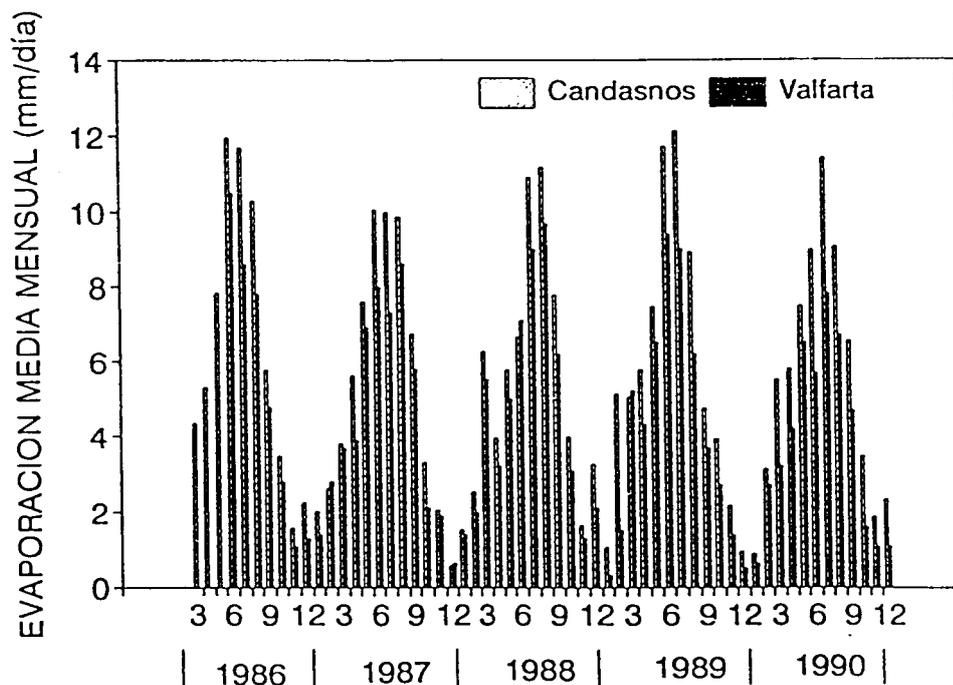


Figura 9. Valores mensuales de evaporación del tanque clase A (mm/día) en las estaciones climáticas de Candasnos y Valfarta durante el período 1986-1990.

La Figura 10 presenta la regresión lineal entre la evaporación del tanque clase "A" (E) y la evapotranspiración de referencia (ET_0) en las estaciones de Candasnos y Valfarta. En ambas estaciones, las ecuaciones son significativas a $P < 0.1\%$, indicando que existe una estrecha correlación entre ambas variables climáticas. Forzando a que estas ecuaciones pasen por el origen de coordenadas, se obtienen unos coeficientes del tanque (definido como la relación ET_0/E) de 0.54 en Candasnos y 0.68 en Valfarta. Estos valores (y especialmente el deducido en Candasnos) son inferiores a los obtenidos por FAO para condiciones climáticas similares a las de este trabajo, debido posiblemente a fenómenos advectivos derivados de la ubicación de los tanques en zonas netamente áridas, en particular para la estación de Candasnos, situada en una parcela de secano.

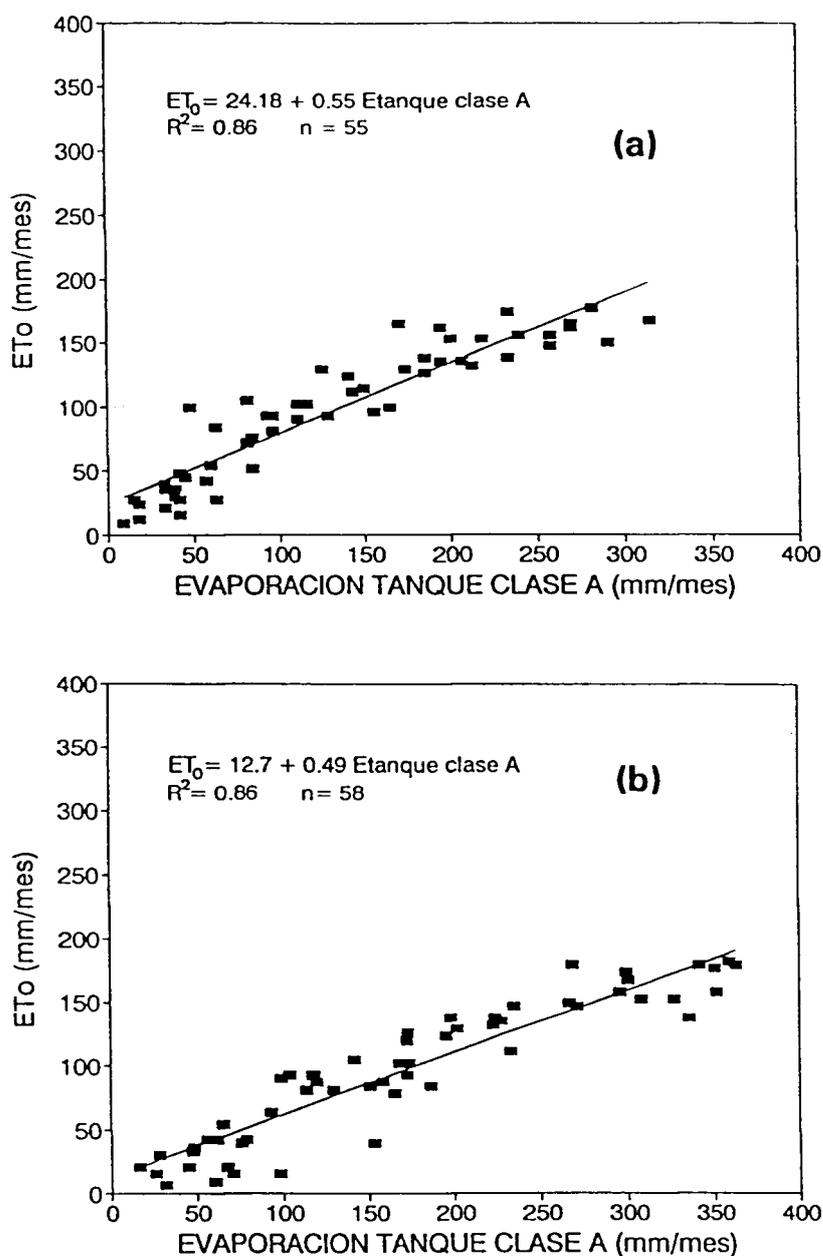


Figura 10. Regresión lineal entre la evaporación del tanque clase A (mm/mes) y la evapotranspiración de referencia (ET_0 , mm/mes) en las estaciones de (a) Candasnos y (b) Valfarta.

3. SUELO

3. SUELO

3.1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de los suelos de la zona regable Monegros II se ha abordado desde dos puntos de vista diferentes: (1) la revisión y síntesis de trabajos previos realizados en esta zona y (2) el seguimiento de la evolución temporal de la salinidad en un área piloto de regadío.

La relación del suelo con el sustrato sobre el que se desarrolla y, más concretamente, su diferenciación por la posición geomorfológica que ocupa, ha sido abordada partiendo de la cartografía geológica a escala 1:50.000. La cartografía de suelos realizada por RENASA (1981) dentro del Plan de Transformación de Monegros II ha sido utilizada como documento base; las unidades de suelo definidas en ese documento se superpusieron a las formaciones geológicas y unidades geomorfológicas definidas en este trabajo (capítulo 4). De esta forma se ha podido establecer la distribución espacial de los principales tipos de suelos, y su relación con el sustrato geológico y la geomorfología del área.

Una vez obtenido un conocimiento global de los suelos del área de Monegros II, el segundo objetivo básico del estudio consistió en establecer las pautas de evolución temporal y la variabilidad espacial de la salinidad del suelo tras su puesta en riego. Para ello, se seleccionó un área piloto de seguimiento en las primeras 500 ha regadas de Monegros II y se estableció una red de puntos de control en los que se efectuaron lecturas periódicas de salinidad con un sensor electromagnético portátil (SEM).

Ambos objetivos deben contribuir a profundizar en el conocimiento de la problemática de la salinidad en Monegros II y, en particular, a establecer pautas experimentales del comportamiento de los suelos de Monegros II en su puesta en riego, aspecto fundamental para el éxito sostenido de este polígono de riego.

3.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

3.2.1. Información existente de los suelos de Monegros II

El estudio de los suelos en Monegros ha sido abordado desde los años sesenta con distintos fines y desde distintos enfoques. El Plan de Transformación de Riegos de Monegros II ha dado lugar a la elaboración de varios estudios de suelos, encargados por el Instituto de Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA), para seleccionar las zonas de mejor aptitud agronómica. El primero de los estudios de suelos con este objetivo fue realizado a escala de reconocimiento por una empresa consultora (PANTECNIA, 1967) y sus resultados fueron muy limitados debido a la escasa información que proporcionan los estudios de suelos a este nivel de detalle. Se ponen de manifiesto en este estudio los

principales problemas del área: salinidad, pedregosidad, falta de profundidad e inexistencia de drenaje en determinadas áreas.

RENASA efectuó posteriormente los estudios semidetallado (1979) y detallado (1981), que supusieron una aportación importante al conocimiento de los suelos del área. El estudio detallado, efectuado con una densidad de observaciones de 1/1.000 ha, condujo a la delimitación de las zonas con suficiente potencial para riego y a la clasificación de dicho potencial en términos de aptitud, y supuso un descenso importante (de 200.000 a 66.000 ha) de la superficie regable inicialmente planificada en el Plan General de Transformación. Las principales causas de la reducción de la superficie regable fueron: (1) la topografía, (2) la elevada salinidad, (3) la falta de estructura del horizonte superior, (4) la elevada pedregosidad, (5) la falta de profundidad útil y (6) el elevado contenido de carbonatos en fase sólida. La clasificación del territorio (204.000 ha) en clases de aptitud derivada de este estudio considera de alta aptitud al 1% de los suelos, de aptitud moderada al 19%, de aptitud marginal al 23%, de aptitud restringida al 12%, de aptitud mixta al 19% y no apta al 21 %. El resto de la superficie era ya de regadío en el momento de la realización del estudio.

Paralelamente a los estudios de aptitud para el riego se han llevado a cabo estudios genéticos de suelos, que tienen como base una cartografía geomorfológica y que además presentan asociaciones entre unidades topográficas y geomorfológicas con propiedades y características agronómicas de los suelos (Alberto et al., 1979, Alberto et al., 1984).

Las cartografías de suelos de las provincias de Zaragoza y Huesca a escala 1:250.000 (C.S.I.C., 1970) y el Mapa de Suelos de España (Escala 1:400.000, U.E.I. de Edafología-EE Aula DEI, 1980) presentan un porcentaje muy importante del área Monegros ocupada por suelos afectados por sales y un porcentaje poco importante por fluvisoles y por suelos con costra caliza. Las hojas nº 385, 386 y 414 de Cultivos y Aprovechamientos y de Clases Agrológicas del M.A.P.A no presentan una cartografía de los suelos, pero los clasifican según la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975) como (1) Entisoles (suelos con pendiente pronunciada, desarrollados sobre margas y yesos, y pobres en materia orgánica), (2) Inceptisoles (ocupan el 80 % de la superficie de las tres hojas y se caracterizan por situarse sobre plataformas y por una productividad limitada por la elevada proporción de carbonatos, yesos y pedregosidad -Xerochrepts-) y (3) Aridisoles (desarrollados sobre calizas o yesos, están medianamente evolucionados). Sólo en la Hoja 414 (Bujaraloz) se habla de la presencia de suelos con problemas de salinidad, tan citados en otros estudios.

La preocupación por la génesis de estos suelos salinos, asociada a causas climáticas, geológicas y antrópicas, es recogida en los estudios de Alberto et al. (1979), Herrero (1982), Alberto et al. (1984) y Cuchí (1986).

Alberto et al. (1979) consideran que, desde el punto de vista agronómico, los suelos de este área poseen varios factores limitantes: la poca profundidad del suelo, la presencia de costra caliza a poca profundidad y la pedregosidad. Del mismo modo presentan salinidad variable ligada a su posición en el interior de la isoyeta de 400 mm y dentro de la zona de régimen de humedad arídico o xérico según la Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 1975). Estas consideraciones son tratadas con mayor profundidad por Alberto et al. (1984), donde se presenta un mapa edafológico a escala 1:200.000 que cubre toda el área

regable Monegros II, y por Cuchí (1986), si bien éste hace aportaciones complementarias al conocimiento de los suelos de la plataforma Bujaraloz-Sástago, centrándose en la génesis de los suelos salinos. Este autor señala la estrecha relación entre los suelos y la geomorfología, separando los suelos desarrollados sobre la plataforma de los desarrollados en depresiones en cuanto a determinados factores que inciden en su génesis: topografía, ausencia de nivel freático dentro de la profundidad del perfil, régimen hídrico, roca madre y vegetación.

Estos trabajos supusieron un importante avance en el conocimiento de los suelos de Monegros II. Sin embargo, ni su finalidad ni su escala permiten el estudio de detalle de la variabilidad espacial de la salinidad y de los problemas de drenaje. Por ello, el IRYDA ha iniciado recientemente unos estudios de detalle en aquellos sectores de más próxima implantación del regadío (Sector IV; Beltrán, 1989).

La cartografía realizada por Alberto et al. (1984) es revisada posteriormente por Machín y Arrúe (1989) a escala 1:75.000, siguiendo la metodología FAO (1985). En el mapa figuran dos unidades cartográficas principales: la primera con problemas de salinización, independientemente de que dispongan de una red de drenaje natural más o menos activa, y la segunda, en la que concurren salinidad y drenaje impedido. Estos autores se refieren concretamente a los suelos del área Bujaraloz-Sástago, destacando la salinidad como el rasgo común de los suelos. Señalan asimismo una diferenciación de los suelos por la posición geomorfológica: los suelos de las áreas deprimidas, que denominan suelos salino-sódicos yesíferos con magnesio y los suelos salinos de la plataforma, que denominan suelos salino-sódicos yesíferos.

Dentro del área de estudio, las superficies ocupadas por suelos con sales son de 16.160 ha y las superficies ocupadas por yesos de 153.220 ha dentro de las 204.000 ha que comprende la futura área regable de Monegros II (Berga et al, 1990).

Otros estudios recogen aspectos parciales de los suelos del área de estudio, como los relacionados con las comunidades vegetales (Terradas, 1973, 1986; Ochoa, 1977; Herrero, 1982). Terradas cita en sus estudios la presencia de comunidades vegetales halófitas en las áreas deprimidas, en las vales e incluso en zonas topográficamente elevadas, haciendo especial referencia a los suelos asociados y a las condiciones climáticas de extrema aridez a que está sometida la vegetación.

Herrero (1982) realiza un estudio de la salinidad y contenidos iónicos de los suelos del Hoyo Agustín (Bujaraloz) con las comunidades vegetales halófitas que alberga. Los suelos de esta gran depresión se clasifican como Aridisoles. Se presenta un Gypsic Salorthid en el Suaedetum brevifoliae y epipedión ócrico y endopedión sálico. Destacan los contenidos de carbonatos, presentes en todos los casos aunque sin superar el 35 %, el carácter salino-alkalino (C.P.C.S, 1967) y la existencia de una salinización mixta clorurada-sulfatada.

Las obras civiles relacionadas con las transformaciones en regadío también han originado un buen número de estudios geotécnicos que han recogido información puntual referente al suelo (LLamas, 1962; Riba y Macau, 1962).

La empresa consultora GEOESTUDIOS (1988) presenta información de las vales de

la Formación Yesos de Retuerta. En su estudio se han cartografiado detalladamente los rellenos cuaternarios y se hace una descripción litológica de los mismos, destacando la ocupación de los fondos de las vales por "limos yesíferos".

Las empresas JAISMA (1989) y CONTROL 7 (1990) hacen referencia en sus informes a las características geotécnicas de los materiales de una franja al noroeste del área de estudio, y citan la existencia de aguas subterráneas a menos de 10 m de profundidad en el trazado del Canal de Sástago en su parte norte, así como en la zona de ubicación del embalse en el sector IV.

A modo de síntesis, en la Tabla 11 figuran las superficies ocupadas por suelos salinos y/o yesosos en Monegros II estimadas por distintos autores. En ella se ve reflejada la magnitud del problema de la salinidad y la importante presencia de los yesos. Aunque el yeso "per se" no produce iones que causen descensos de rendimiento de los cultivos, su delimitación resulta importante por su probable coexistencia con iones tóxicos, así como por los problemas identificados en suelos con alto contenido en yeso (Alphen y de los Ríos, 1971; Herrero y Porta, 1991; Herrero, Porta y Fedoroff, 1992).

Tabla 11. Tabla resumen de las estimaciones de diferentes autores sobre las superficies con suelos salinos (s) y/o con yeso (y), y el porcentaje respecto al total de la superficie de Monegros II (204.000 ha).

AUTOR	SUPERFICIE (ha)	PORCENTAJE
RENASA (1981)	28000 (s)	14.0
Machin y Arrue (1989)	8250 (s) 41125 (y)	3.8 18.9
Berga et al. (1990)	16160 (s) 153220 (y)	8.0 75.0

3.2.2. El sensor eletromagnético como técnica de medida "in situ" de la salinidad del suelo

Los estudios específicos de suelos anteriormente citados han abordado el estudio de la salinidad del suelo mediante la determinación de la CE en extracto de pasta saturada o procedimientos similares, sobre muestras extraídas en observaciones de campo.

En la última década, este trabajo laborioso se esta complementando con técnicas geofísicas de medida "in situ" de la conductividad eléctrica aparente del suelo, tales como las técnicas resistimétricas o electromagnéticas. Así, el sensor electromagnético (SEM), cuyo fundamento describen De Jong et al (1979), se basa en la generación de una onda electromagnética primaria (por medio de una bobina transmisora colocada sobre la superficie del suelo) que induce una corriente electromagnética secundaria en el perfil del suelo, con el resultado de un incremento de la señal electromagnética primaria que es detectado por una bobina receptora (De Jong et al., 1979; Rhoades y Corwin, 1981; Williams y Baker, 1982; Aragüés et al., 1986).

Esta medida está relacionada con la conductividad eléctrica aparente (CE_a) del volumen de suelo interceptado por la onda electromagnética primaria y depende de la conductividad eléctrica de la solución del suelo, del contenido volumétrico de agua en el suelo, de un factor de tortuosidad ligado a la geometría del medio poroso atravesado por la onda electromagnética, de la CE asociada a la matriz del suelo y de la temperatura del suelo (Aragües et al., 1986; Rhoades y Corwin, 1981).

Las ventajas y limitaciones de este método han sido resumidas, entre otros, por Aragües et al. (1986). Entre las ventajas cabe señalar que se trata de un método no destructivo, portátil y que permite hacer las medidas de manera rápida (tiempo de respuesta instantáneo) y sencilla, pueden repetirse sobre el mismo punto y permiten obtener un registro continuo de la CE_a . Además, permite medir un volumen elevado de suelo y realizar lecturas a una profundidad variable sin necesidad de contacto entre el suelo y el instrumento.

Las limitaciones más importantes del SEM, al margen de su precio elevado, son la necesidad de calibración para cada tipo de suelo y estado de humedad (o al menos para ciertos intervalos de ambas variables), la imposibilidad de determinar directamente la salinidad en intervalos discretos de profundidad del suelo, la necesidad de corrección de la lectura a 25°C, la interferencia con objetos metálicos y el hecho evidente de que sólo mide la CE_a y, por lo tanto, no proporciona información acerca de la composición iónica de la solución del suelo.

Aunque se trata de un método relativamente poco contrastado, en los últimos años se han llevado a cabo estudios de calibración tanto en otras áreas (Rhoades et al., 1981-1990) como en el Valle del Ebro (Aragües, 1987; Herrero y Bercero, 1991; Díaz y Herrero, 1992) con resultados excelentes, razón por la cual se ha efectuado su aplicación a las nuevas áreas regadas del polígono Monegros II.

3.3. MATERIAL Y METODOS

La cartografía de RENASA (1981) ha servido como documento base edafológico en el Plan General de Transformación (IRYDA, 1985), en los Planes Coordinados de Obras de los sectores I y II (1988) y en todas las actuaciones posteriores en Monegros II. Su amplia utilización y su nivel de detalle han resultado un factor decisivo para tomar la misma como referencia.

Paralelamente a la elaboración de la cartografía geológica (apartado 4.4) se ha realizado una comprobación de campo y mediante fotointerpretación (vuelos 1:33.000 (1978) y 1:18.000 (1977)) de las diferentes unidades de suelos cartografiadas en el estudio de RENASA (1981). Las diferentes unidades de suelos se han identificado mediante observaciones en barrancos, taludes en la red de caminos o zanjas con el perfil de suelo recientemente descubierto. Ello ha permitido identificar las unidades geomorfológicas y de suelo en cada formación o miembro geológico. En relación con el seguimiento de la salinidad del suelo, se han establecido una serie de puntos de control en el área del barranco de Valcuerna que comenzó a regarse en Mayo de 1987. La superficie de este área piloto es de 500 ha y se halla dividida en parcelas de unas 25 ha.

Los puntos de medida se establecieron en una red de densidad inicial 150 x 150 m. En las áreas de muy baja salinidad o de salinidad constante se eliminaron posteriormente algunos puntos por estimar suficiente una densidad menor. La mayor parte de los puntos

suprimidos se sitúan en la zona sur (Figura 11).

Las medidas se han efectuado periódicamente con un sensor electromagnético (SEM) portátil modelo EM-38 de GEONICS Ltd. En cada punto se efectuaban sucesivamente dos medidas, una con el SEM apoyado sobre el suelo con las bobinas en posición horizontal (SEMH) y otra en posición vertical (SEMV). La lectura en posición horizontal se asocia a la CE_e de 0-1 m y la lectura en posición vertical se asocia a la CE_e de 0-2 m. Estas lecturas se corregían posteriormente a 25°C, utilizando la temperatura del suelo medida con un termómetro clavado a unos 40 cm de profundidad y las Tablas correspondientes de conversión (USSL, 1954).

Con objeto de realizar las sucesivas lecturas a una humedad de referencia, éstas se efectuaban preferentemente dos días después del riego o al día siguiente de una lluvia, con el suelo en estado hídrico próximo a la capacidad de campo. En la zona sur coinciden generalmente las fechas de riego de todas las parcelas, pero en la zona norte hay un desfase temporal importante entre parcelas y con la zona sur. Generalmente un riego del área completa supone un período de entre quince y veinte días.

En la primera campaña de medidas, además de medir la CE_e en los puntos de la red, se realizaron cuatro lecturas suplementarias en un radio de un metro alrededor de cada punto. Dado que no se observaron diferencias superiores al 5% entre la medida central y la media de las cinco lecturas, el procedimiento se simplificó en las medidas posteriores haciendo una sola lectura en cada punto.

Durante el año 1988 se realizaron medidas de la CE_e al inicio (2.5.88) y final (11.10.88) de la estación de riego. En 1989 las medidas se efectuaron antes (8.2.89), durante (20.7.89) y al final (9.10.89) de la estación de riego. En 1990 se disminuyó la red de puntos de muestreo y la frecuencia (un solo muestreo el 29.6.90) debido a las obras que tuvieron lugar en el área de estudio (sustitución y eliminación de la antigua red de caminos y eliminación de parte de la red antigua, desviación del trazado natural del cauce, excavaciones y movimientos de tierras, colocación de tuberías de presión que inhabilitaban temporalmente el uso de los caminos o de las parcelas, etc.).

Además de las medidas indicadas, en el sector II de Monegros II se utilizó una parcela situada a 10 Km de la zona regada de Valcuerna, que estaba dotada de red fija de aspersión, para establecer la relación funcional entre las lecturas del SEM (CE_e) y la salinidad del suelo, expresada como conductividad eléctrica del extracto saturado y en extracto 1:5 (suelo:agua). Se estableció una malla de 15 x 5 m sobre cuyos nodos se realizaron medidas con SEM dos días después del riego. Se midió la temperatura del suelo y se tomaron muestras de suelo de 0 a 30 cm y de 30 a 60 cm de profundidad en ocho puntos. Sobre las muestras de suelo se realizó el extracto de saturación y el extracto 1:5 y se midió la CE (CE_e y $CE_{1:5}$, respectivamente). A cada punto se le atribuyó la CE media de la conductividad eléctrica obtenida en las dos profundidades.

El estudio de la relación entre CE_e y CE_e o $CE_{1:5}$ se realizó por análisis de regresión simple con el SEM en posición horizontal, método de resultados aceptables cuando los valores de CE_e son elevados (Aragüés et al., 1986; Herrero y Bercero, 1991).

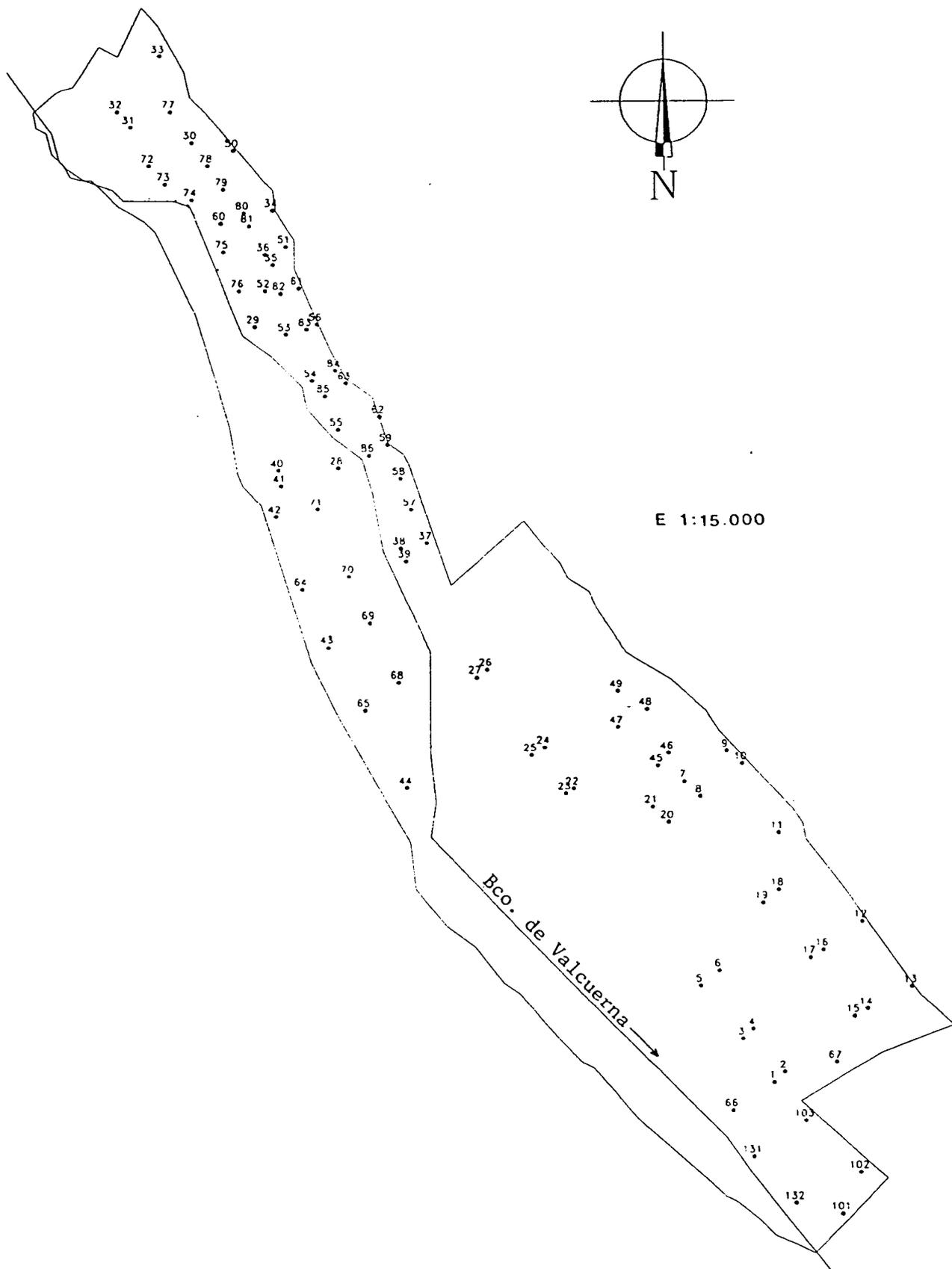


Figura 11. Localización de los puntos de medida de la CE_s del suelo con el sensor electromagnético en la zona de regadío de la Valcuerna (Monegros II).

3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4.1. Revisión y síntesis de la cartografía de suelos

Dentro de cada formación geológica cartografiada a escala 1:50.000 (apartado 3.4.) se han revisado las características y distribución espacial de las unidades geomorfológicas y de los suelos tipificados en el estudio de RENASA.

En el Mb. Yesos de Retuerta de la Formación Zaragoza, que ocupa el extremo occidental del área, pueden diferenciarse dos grandes unidades bien definidas geomorfológicamente y una tercera unidad de menor extensión superficial.

La primera unidad geomorfológica está constituida por una sucesión de colinas de yeso que atraviesan la formación geológica en dirección NE-SO. Los suelos correspondientes a esta unidad se caracterizan por su escasa profundidad y presencia generalizada de yeso en el perfil. RENASA cartografía en esta unidad tres tipos diferentes de suelo aunque, desde nuestro punto de vista, todos ellos pueden integrarse dentro de un único tipo.

La segunda unidad es de enlace entre los relieves de la primera unidad y la plataforma Bujaraloz-Sástago, y está constituida por las laderas que parten de los relieves y enlazan con la plataforma. Presenta suelos de profundidad variable, más profundos cuanto más se aproximan al Mb. Bujaraloz. Otras características importantes de estos suelos son la abundante pedregosidad superficial, la presencia generalizada de yeso y la salinidad, que es variable horizontal y verticalmente en el perfil.

La tercera unidad está constituida por formas de enlace, de gran relieve, entre el Mb. Yesos de Retuerta y la Fm. Caspe, y está ocupada por suelos esqueléticos cuya descripción por RENASA coincide con nuestras observaciones.

En este Miembro geológico, RENASA cartografía suelos asociados a zonas de acumulación coluvial, laderas de piedemonte diseccionadas, llanuras de yeso, colinas de yeso, llanuras erosionadas de limolita y caliza, y llanuras fuertemente diseccionadas. Esta gran subdivisión no corresponde, desde nuestro punto de vista, a la existencia de diferencias geológicas o geomorfológicas relevantes. Abundando en el exceso de subdivisiones, cabe decir que la mayor parte de las unidades definidas no poseen observaciones de campo.

El Mb. Bujaraloz supone un cambio de facies importante desde el punto de vista litológico. Debido a ello, los suelos desarrollados sobre esta formación geológica poseen características notablemente diferentes a los de la formación geológica anterior. Al tratarse de una formación con materiales calcáreos culminantes, los suelos desarrollados sobre ella son pedregosos y someros (entre 20 y 50 cm de profundidad) y con escaso contenido en materia orgánica. El 20% de estos suelos contienen yesos y sales.

Los suelos situados al Sur de esta unidad tienen una profundidad variable y presentan mayor superficie ocupada por suelos con yesos o sales (el 40% de los suelos tienen yesos y/o sales) que los situados más al Norte.

El paso hacia el Sur del Mb. Bujaraloz a la formación Caspe está caracterizado por suelos con las mismas características que los del paso al Mb. Yesos de Retuerta. Son suelos con escaso desarrollo, con cierta pedregosidad y niveles de salinidad variables.

Es de destacar la presencia sobre esta formación geológica de los suelos que ocupan los fondos de las cubetas endorreicas. La mayoría son extremadamente salinos como resultado de la litología, de la influencia de las capas freáticas y del funcionamiento hidrogeológico del sistema en el que estas zonas actúan como áreas de descarga con elevadas evapoconcentraciones. Son suelos generalmente ocupados por vegetación halófila, aunque algunos fondos de cubeta se han cultivado con escaso éxito.

RENASA (1981) hace una división dentro de este Mb. geológico entre la zona norte, en la que apenas presentan observaciones de campo, y la zona sur en la que poseen numerosas observaciones de campo. La única unidad en que se cartografía la zona norte no es sustancialmente diferente de una de las unidades de la zona sur, por lo que deberían cartografiarse en una sola unidad. Dentro de la zona sur sí existen diferencias entre las unidades cartografiadas, que se corresponden con variaciones geológicas y geomorfológicas y su división se sustenta además con observaciones de campo.

El Miembro Sigena no presenta en el área de estudio una gran diferenciación ni geomorfológica ni litológica. En él pueden diagnosticarse tres unidades geomorfológicas: Relieves, Laderas de piedemonte y Relleno aluvial.

Los suelos correspondientes a la primera unidad, como la mayoría de los suelos situados en zonas con una cierta pendiente, están poco desarrollados y son superficiales. En algunas áreas existen horizontes de acumulación de yeso o carbonatos a profundidades menores de 30 cm.

Los suelos de las Laderas de piedemonte son más profundos (no superando los 50 cm), presentan un perfil poco diferenciado y con escasa pedregosidad superficial, muy bajos contenidos de materia orgánica y están exentos de salinidad. Los rellenos aluviales en esta formación son profundos (entre uno y dos metros) y presentan cierta proporción de limos. Ocupan los fondos de las vales que están destinadas a cultivo de cereal.

Dentro de las tres unidades citadas hay una serie de vales con rellenos aluviales cuaternarios en los que se desarrolla uno de los suelos más profundos del área, sin pedregosidad y sin horizontes de yeso o carbonato en el perfil. Su naturaleza geológica de limos con alto contenido en yeso puede explicar la omisión de estos suelos en los estudios de RENASA. En la actualidad están ocupados por cereales, pero se han excluido de la futura zona regable.

El Mb. Calizas de Peñalba presenta tres unidades geomorfológicas bien diferenciadas: (1) Plataforma, (2) Laderas de piedemonte y (3) Cuaternario aluvial.

Las características de estos suelos no son sustancialmente diferentes a los de la Plataforma Bujaraloz-Sástago del Mb. Bujaraloz, si bien la presencia de niveles lutíticos muy frecuentes en la formación Calizas de Peñalba da localmente suelos más desarrollados y profundos. La salinidad y la pedregosidad en los suelos de esta formación no son tan importantes como en el Mb. Bujaraloz.

Dentro de la Plataforma, RENASA (1981) diferencia cuatro tipos de suelos caracterizados por la escasa profundidad y por horizontes no diferenciados, así como por niveles de salinidad variables. La posición de los horizontes cálcicos determina la diferenciación entre unidades, aunque resulta excesiva si se tiene en cuenta el escaso número de observaciones realizadas.

Las Laderas de piedemonte presentan una mayor variabilidad en los suelos. De Norte a Sur disminuyen sus profundidades y aumentan la salinidad y la pedregosidad. RENASA diferencia los suelos de esta unidad según la posición de horizontes de diagnóstico.

El Cuaternario aluvial es la unidad más interesante desde el punto de vista agrícola, ya que se trata de suelos desarrollados sobre un relleno muy profundo. Al contrario que el relleno aluvial de otras formaciones geológicas, en esta unidad la componente fundamental no son los limos, los niveles de salinidad son moderados y presentan una cierta cantidad de materia orgánica, muy superior al resto de los suelos. Sobre esta unidad de suelos se ha efectuado el seguimiento de la salinidad del suelo.

El Mb. Los Arcos presenta las mismas unidades geomorfológicas que el Mb. Calizas de Peñalba aunque con menor extensión. Los suelos desarrollados sobre la plataforma y las laderas de piedemonte comparten las características de los suelos de la formación geológica anterior. Los suelos aluviales ocupan mayor superficie que en el resto de las formaciones y se caracterizan por ser profundos, sin pedregosidad y con niveles de salinidad variables.

Otras características apuntadas en el estudio de suelos de RENASA que tienen interés para nuestro trabajo son la existencia de niveles freáticos y la capacidad drenante de los suelos. Respecto a la primera, el estudio de RENASA afirma para todo el área Monegros II que "de existir, la capa freática se situará a una profundidad mayor de 10 m". Hay que llamar la atención sobre esta afirmación, ya que contrasta notablemente con nuestras observaciones realizadas en 72 puntos de control del nivel freático o piezométrico en los Mb. Yesos de Retuerta, Mb. Bujaraloz, Mb. Los Arcos y Mb. Calizas de Peñalba, en los que el nivel medido se sitúa generalmente por encima de los 10 m o incluso por encima de los 6 m en el Mb. Bujaraloz. El hecho de no observar niveles freáticos dentro de la profundidad estudiada ha podido conducir en el estudio de RENASA a esa conclusión a todas luces incorrecta. Así, la ejecución de las numerosas obras que contempla el Plan de Transformación está permitiendo constatar la existencia generalizada de aguas más o menos profundas en todas las formaciones geológicas comprendidas en el área de estudio. Las observaciones realizadas en los numerosos estudios geotécnicos (PROYEX, 1990; JAISMA, 1989; CONTROL 7, 1990) de los sectores I, II y IV, actualmente en transformación, situados en los Mb. Calizas de Peñalba, Mb. Sigena y Mb. Bujaraloz, muestran generalmente presencia de capas freáticas, bien en los rellenos aluviales, bien en materiales litológicos, a menos de 5 m de profundidad.

3.4.2. Seguimiento de la salinidad de los suelos regados en Monegros II

Se efectuaron medidas en setenta y cinco puntos establecidos en una cuadrícula de 150 x 150 m sobre un área piloto situada en el Barranco de Valcuerna (Figura 11). El área piloto comprende parte de los sectores I y II, que han sido los primeros sectores transformados en regadío dentro del Proyecto Monegros II.

La zona estudiada es de regadío muy reciente y no ha alcanzado un régimen hídrico estacionario. Además, ha estado afectada por las obras de transformación en regadío, obras de influencia variable en el tiempo y en el espacio, así como en las condiciones locales de drenaje. Ambos aspectos afectan a la interpretación de los resultados, ya que las técnicas geofísicas resistimétricas y electromagnéticas vienen afectadas sensiblemente por la humedad del medio poroso. Por ello, el trabajo que se presenta debe contemplarse como el de unos resultados iniciales, de indudable interés en el contexto de un seguimiento a medio y largo plazo de la salinidad del regadío, pero que deben tomarse con cautela por el corto período transcurrido desde su puesta en regadío (en torno a dos-tres años).

3.4.2.1. Calibración del sensor electromagnético (SEM)

Una de las limitaciones más importantes del SEM es la necesidad de calibración para cada tipo de suelo y estado de humedad del mismo. Debido a la necesidad de calibrar el método en el área piloto, se eligieron ocho puntos de medida dentro de una parcela de regadío del sector II.

La Tabla 12 presenta los datos utilizados para la calibración del SEM. A partir de los mismos se han efectuado las regresiones señaladas en el apartado anterior que indican que la CE_s está significativamente correlacionada ($P < 0.01$) tanto con la CE_e (Figura 12) como con la $CE_{1:5}$ (Figura 13).

Tabla 12. Valores de SEM horizontal (CE_s), CE del extracto saturado (CE_e) y del extracto 1:5 ($CE_{1:5}$), medidos en una parcela de regadío del sector II de Monegros II.

	CE_s	CE_e	$CE_{1:5}$
PUNTO	dS/m a 25°C		
1	2.64	9.80	1.22
2	2.42	7.11	1.08
3	1.58	3.23	0.54
4	0.92	1.15	0.25
5	0.90	1.08	0.24
6	1.18	2.18	0.39
7	1.17	2.14	0.39
8	0.88	0.98	0.23

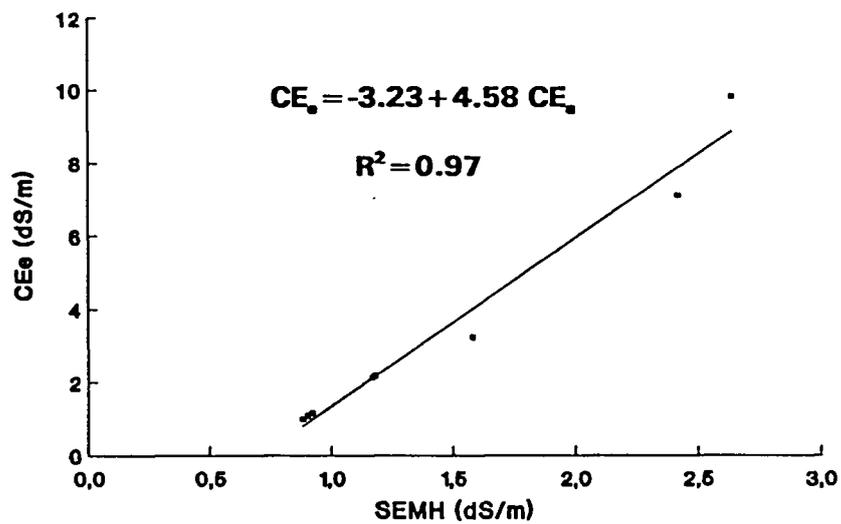


Figura 12. Regresión lineal entre los valores de CE obtenidos en extracto de pasta saturada (CE_s , dS/m) y las lecturas del SEM horizontal (CE_e , dS/m).

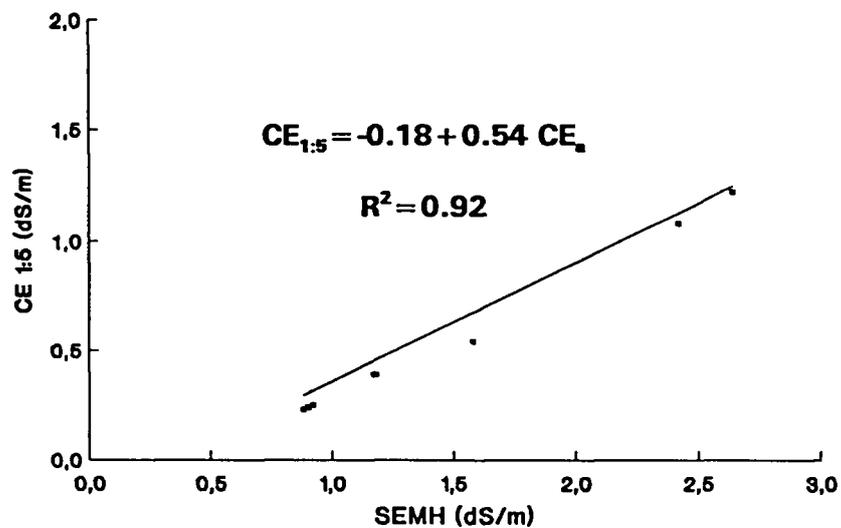


Figura 13. Regresión lineal entre los valores de CE obtenidos en extracto 1:5 ($CE_{1:5}$, dS/m) y las lecturas del SEM horizontal (CE_s , dS/m).

Las ecuaciones de regresión obtenidas son similares a las deducidas por Herrero y Bercero (1991) en Quinto de Ebro y por Díaz y Herrero (1992) en Flumen, y permiten concluir que este instrumento es fiable para el diagnóstico de la salinidad del suelo del área de estudio si se efectúan las medidas a una humedad de referencia.

Ello permite sustituir, en una perspectiva a largo plazo, el muestreo y análisis del suelo por las lecturas del SEM, lo que a su vez permite incrementar sustancialmente la frecuencia y densidad de los muestreos y, por lo tanto, la precisión en el análisis de la variabilidad temporal y espacial de la salinidad.

3.4.2.2. Evolución temporal de la salinidad del suelo

Los datos previos disponibles de salinidad de los suelos de Monegros II corresponden a la plataforma Bujaraloz-Sástago (Alberto et al., 1979, 1984; Herrero, 1982; Cuchí, 1986; Machín y Arrúe, 1989). Los muestreos de suelo en los sectores I y II son escasos y proceden de los estudios de RENASA (1981). De estos muestreos sólo cuatro calicatas (D-67, D-133, D-134 y D-135) corresponden al área actualmente en regadío. La información procede de los 45 cm más superficiales del perfil y se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13. Valores de CE_e y relación de adsorción del sodio (RAS) de los primeros 45 cm de suelo obtenidos en cuatro calicatas realizadas en los sectores I y II de Monegros II (RENASA, 1981).

PUNTO	CE_e (dS/m)	RAS (meq/L) ^{0.6}
D-67	1.6	1.3
D-133	0.4	0.6
D-134	0.5	0.8
D-135	0.8	0.7
MEDIA	0.82	0.85
CV (%)	66	36

Este trabajo permite conocer algunos datos acerca de la salinidad y contenido iónico de estos suelos anteriores al riego, como son unos valores de CE_e mínimos de 0.4 dS/m y máximos de 1.6 dS/m. El valor medio de 0.8 dS/m con un CV del 66 % indica un contenido salino muy bajo de los suelos y una variabilidad espacial importante. Los valores

de RAS oscilan entre 0.7 y 1.3, con un valor medio muy bajo de 0.8 y un coeficiente de variación menor que el de la CE_e . Debe además señalarse que la calicata D-67 se halla situada en la zona norte (Fig.11) y presenta los valores más elevados de CE_e y RAS, mientras que el resto de las calicatas, más próximas entre sí, se encuentran en la zona sur y sus valores de CE_e y RAS son más similares.

Tal como se ha comentado anteriormente, la superficie regada ha ido incrementándose paulatinamente desde las 500 ha de 1987, cuyo seguimiento se presenta aquí, hasta las 1.200 ha en 1990. Toda la superficie se riega por aspersión, el 85% mediante sistemas móviles y el 15% restante con sistemas fijos. Los cultivos mayoritarios durante estos años han sido cebada y girasol, aunque existen en la zona norte pequeñas superficies con maíz. La disponibilidad de agua de manera casi continua ha permitido un período de riego muy amplio (Febrero a Octubre), con una frecuencia de riego quincenal y una aplicación de volúmenes de riego elevados (8.000 a 13.000 m³/ha/año) (Guarda fluvial C.H.E.; comunicación personal). La salinidad del agua de riego es muy baja ($CE < 0.4$ dS/m), lo que sugiere que no deberían presentarse problemas de salinidad a largo plazo si el drenaje de la zona es adecuado.

Dentro de la zona regada aguas arriba de Peñalba (Figura 11) existen dos áreas definidas entre las que existen algunas diferencias que interesa resaltar, ya que pueden ser útiles en la interpretación de los resultados del seguimiento de salinidad: (1) la zona sur se riega en su totalidad desde 1987, mientras que la zona norte se empezó a regar en la primavera de 1988, ha presentado año a año incrementos de la superficie regable e incluye parcelas no regadas; (2) la zona sur se riega con sistemas móviles de aspersión (máquinas laterales) y su morfología no ha variado durante el seguimiento, mientras que la zona norte se riega tanto con sistemas móviles (pivot) como fijos; (3) la morfología de la zona norte ha variado por la rectificación del trazado natural del cauce; (4) en la zona sur se alternan cebada y girasol y en la zona norte se cultiva únicamente girasol o maíz; (5) todos los suelos corresponden a la misma unidad geomorfológica (relleno Cuaternario aluvial), pero en la zona sur el aluvial es muy amplio, bien desarrollado, con suelos profundos y sin drenaje impedido, mientras que en la zona norte el aluvial es más estrecho, los suelos son menos profundos y enlazan con suelos de piedemonte con mayor pedregosidad; (6) la zona norte posee una topografía alomada con desniveles importantes incluso a nivel de parcela.

Los valores de CE_e medidos para cada punto y fecha de lectura figuran en la Tabla 1 (Zona norte) y Tabla 2 (Zona sur) del Anexo 2. La Tabla 14 presenta la estadística básica, para cada fecha de prospección, de las lecturas en posición horizontal y vertical del sensor. La Figura 14, que es la representación gráfica de la Tabla 14, permite apreciar incrementos de los valores medios de CE_e entre el principio y el final del seguimiento del 57% (SEMH) y 45% (SEMV). Estos incrementos son continuos y consistentes, con excepción del muestreo del 22 de Julio de 1989, donde la disminución de la CE_e respecto al muestreo anterior puede atribuirse, al menos en parte, a la menor humedad superficial del suelo en una fecha en que la demanda de evapotranspiración es la máxima del año (Capítulo 2).

Por otro lado, los coeficientes de variación son elevados, siempre superiores al 45%, y presentan unos valores menores en la configuración vertical que en la horizontal,

lo que indica que la variabilidad espacial es mayor en la parte más superficial del suelo.

Finalmente, las Figuras 15 y 16 presentan el histograma de frecuencias de la CE_e medida con el sensor electromagnético en posición horizontal y vertical, respectivamente. En estas Figuras se observa que la mediana de las observaciones en cada fecha de muestreo se desplaza con el tiempo de forma consistente (con la excepción ya mencionada de Julio-1989) hacia valores de CE_e más elevados, lo que hace que las curvas se acerquen más a una distribución normal.

Tabla 14. Evolución temporal de la CE_e : Estadística básica calculada para los 75 puntos muestreados en seis fechas de lectura del SEM horizontal y vertical.

CE_e (dS/m)						
Fecha	05-88	10-88	02-89	07-89	10-89	06-90
Media	0.70	0.80	0.96	0.90	0.97	1.10
σ_{n-1}	0.36	0.48	0.50	0.50	0.70	0.56
CV (%)	51	60	52	55	73	51
CE_e (dS/m)						
Fecha	05-88	10-88	02-89	07-89	10-89	06-90
Media	0.84	1.03	1.09	0.96	1.21	1.22
σ_{n-1}	0.43	0.51	0.53	0.53	0.67	0.65
CV (%)	52	49	48	55	56	53

Asimismo, se observa que los valores de $CE_e < 0.25$ registrados en las prospecciones de 1988 desaparecen en las lecturas posteriores, en tanto que los valores de $CE_e > 1.5$ dS/m (indicativos de salinidad según la curva de calibración presentada en la Figura 12) son muy escasos en 1988 y mucho más frecuentes en las prospecciones posteriores.

Sin embargo, estos incrementos temporales de la CE_e media del suelo no pueden atribuirse exclusivamente a un aumento de la salinidad de la solución del suelo, ya que la CE_e es también función de la humedad del suelo, que ha podido aumentar progresivamente en el período estudiado, debido a la introducción del regadío.

Otro aspecto de singular importancia es la definición del perfil de CE_e desde el punto de vista de su caracterización como zona de recarga (flujo neto vertical descendente) o de descarga (flujo neto vertical ascendente), ya que ésta última es indicativa generalmente de procesos ligados a la salinización de los suelos (lavado insuficiente, drenaje impedido, capas freáticas superficiales, elevadas demandas evapotranspirativas, etc). Por ello, interesa analizar la evolución relativa de los valores de CE_e superficiales (SEM horizontal) y más profundos (SEM vertical). Dicho análisis indica que el 91% de los puntos presentan un perfil de recarga (esto es, valores de SEM horizontal menores que los de SEM vertical), lo que sugiere que en dichos puntos se alcanzan fracciones de lavado adecuadas. Por el contrario, el 9% de los puntos analizados presentan inicialmente un perfil de descarga (esto es, SEM horizontal > SEM vertical); todos ellos están situados en la zona norte, donde ya se ha comentado que los suelos son menos profundos y existen zonas con drenaje impedido. Sin embargo, la mayoría de estos suelos han evolucionado en el tiempo hacia perfiles tipo recarga, lo que indicaría que las sales acumuladas en superficie se están desplazando en profundidad por efecto del riego.

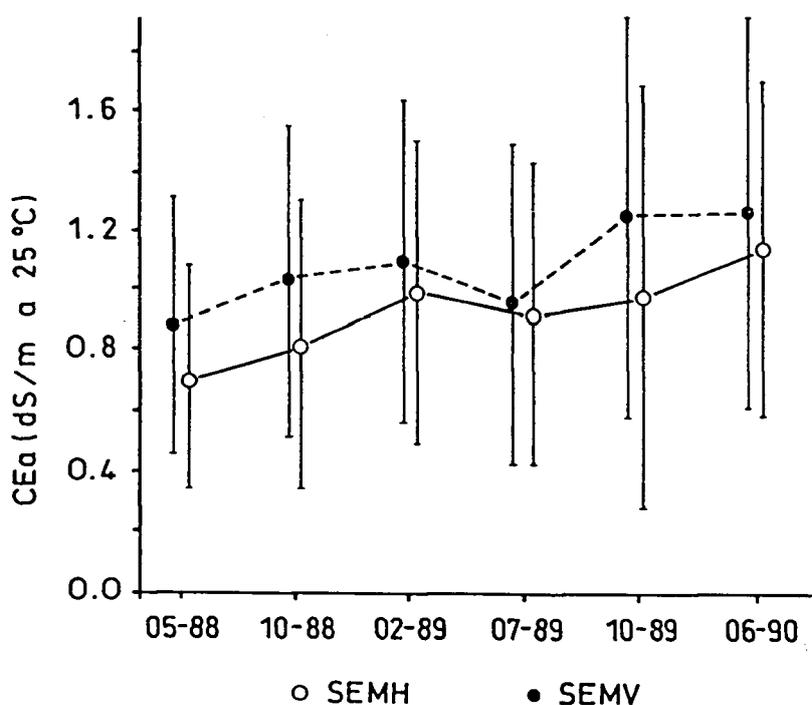


Figura 14. Valores medios y \pm desviación estándar de la CE_e (dS/m) medida en las diferentes fechas de lectura, con el SEM colocado en posición horizontal (SEM H) y vertical (SEM V).

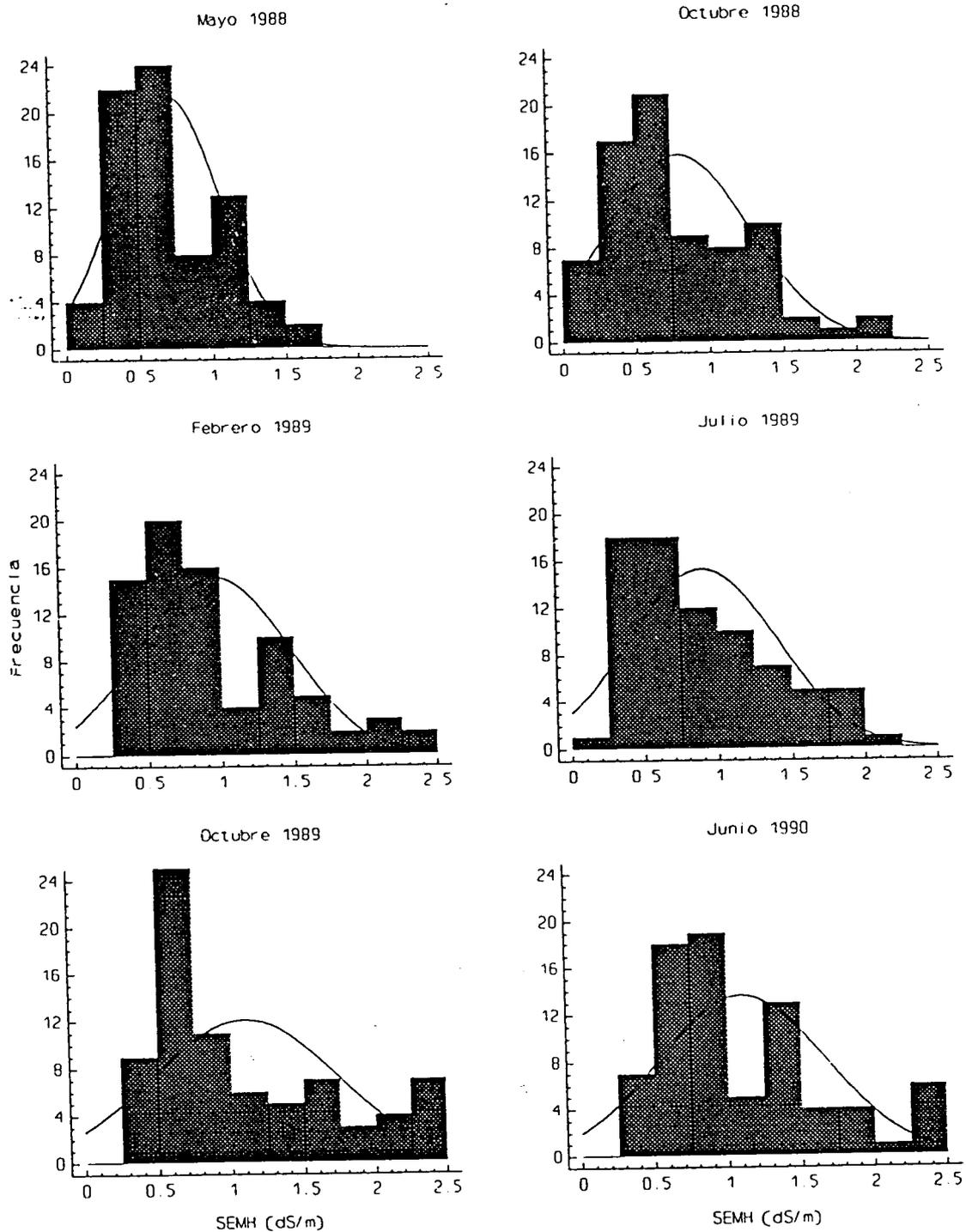


Figura 15. Histograma de frecuencias de la CE_h (dS/m) del SEM horizontal en las diferentes fechas de lectura.

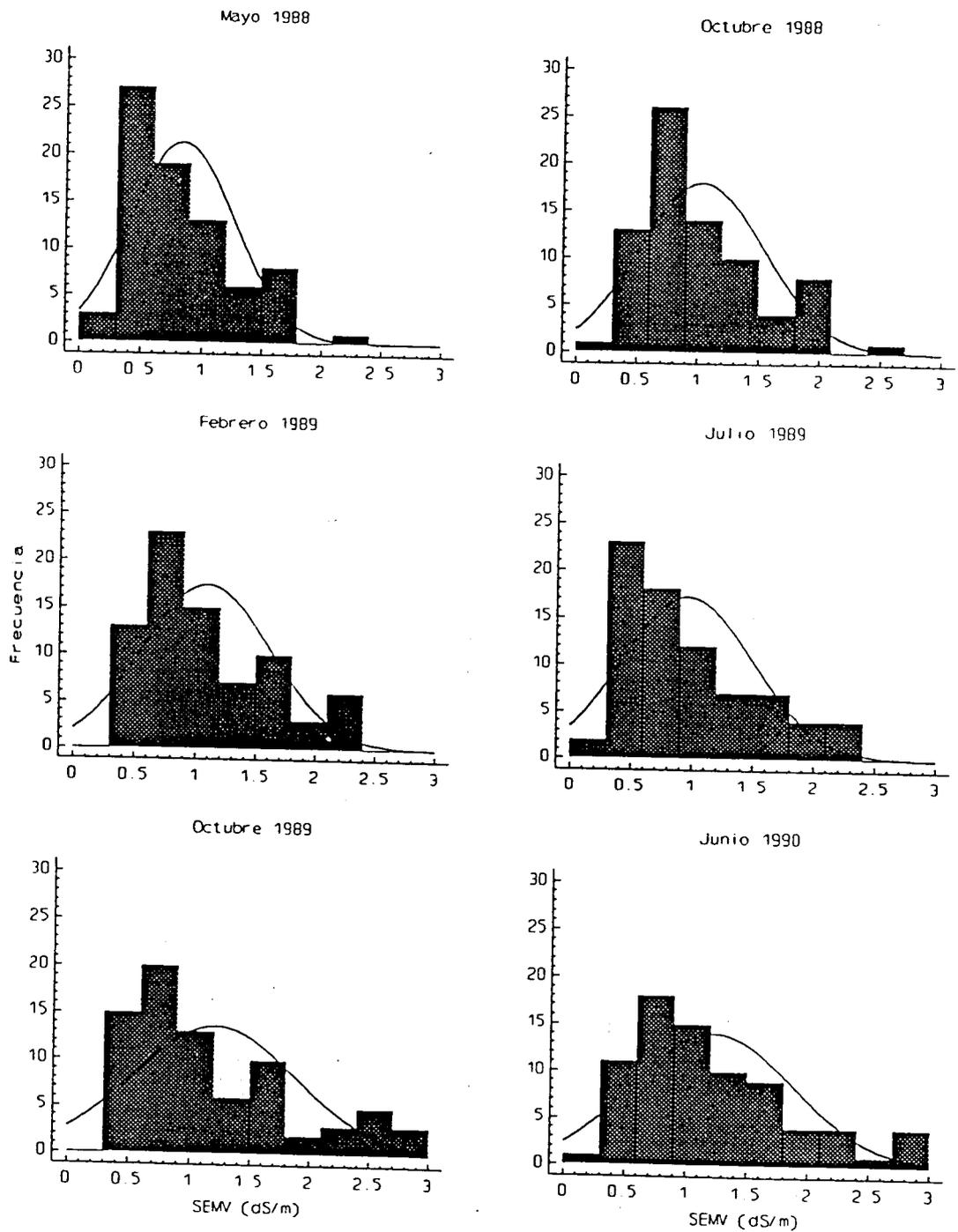


Figura 16. Histograma de frecuencias de la CE_v (dS/m) del SEM vertical en las diferentes fechas de lectura.

Utilizando la ecuación de calibración presentada en la Figura 12 y los valores de CE_e del SEMH de la Tabla 14, se estiman los correspondientes valores de CE_e que se resumen en la Tabla 15. Se han obtenido de este modo valores medios de CE_e entre 0.4 y 1.8 dS/m; esto es, valores del mismo orden de magnitud que los obtenidos por RENASA antes de la introducción del riego (Tabla 13). Esto sugiere que los incrementos de CE_e detectados con el SEM en el período de lecturas serían consecuencia fundamentalmente del incremento neto de humedad del suelo y no de su salinización.

Los coeficientes de variación de las medias presentan valores extremos en Mayo 88 y Octubre 88, debido en parte al uso de una ecuación de calibración obtenida con valores de CE_e muy superiores a los generalmente leídos en la zona de seguimiento. Ello pone asimismo de manifiesto la necesidad de efectuar la calibración para intervalos de conductividad más amplios, y en especial para valores más bajos de CE_e , al objeto de evitar la obtención de valores aberrantes, tales como una media negativa en Mayo de 1988.

Tabla 15. Evolución temporal de la CE_e media estimada: Estadística básica calculada para los 75 puntos muestreados en seis fechas de lectura del SEM horizontal.

CE_e (dS/m)						
Fecha	05-88	10-88	02-89	07-89	10-89	06-90
Media	-0.03	0.42	1.17	0.89	1.21	1.81
σ_{n-1}	1.63	2.20	2.30	2.29	2.48	2.60
CV (%)	5433	524	197	257	205	144

3.4.2.3. Variabilidad espacial de la salinidad del suelo.

Las diferencias ya comentadas entre las zonas norte y sur del área de estudio han conducido a un primer análisis comparativo de los valores de CE_e en cada zona. La Tabla 16 indica que los valores medios de CE_e en la zona norte son algo superiores, especialmente en el muestreo de 1990, aunque la variabilidad expresada por el CV es muy similar. Las mayores diferencias de comportamiento entre ambas zonas se producen para las lecturas del SEM vertical (esto es, prospección de los primeros dos metros de suelo), ya que en el norte la CE_e aumenta con el tiempo, en tanto que en el sur la CE_e se estabiliza a partir de Octubre de 1988.

Las razones de este comportamiento diferencial no son evidentes dado el escaso período de tiempo transcurrido, pero sugieren que la zona sur está más estabilizada, quizá debido a que lleva más tiempo regándose y los suelos son más profundos y permeables. Por el contrario, los suelos de la zona norte son menos profundos, lo que hace que existan limitaciones de drenaje por la presencia a menor profundidad del sustrato más o menos impermeable.

Tabla 16. Seguimiento de salinidad del suelo en el Barranco de Valcuerna. Estadística de los valores de CE_e obtenidos en las diferentes fechas de lectura en las zonas norte (43 puntos) y sur (32 puntos).

ZONA NORTE - SEM HORIZONTAL (CE_e, dS/m)						
Fecha	05-88	10-88	02-89	07-89	10-89	06-90
Media	0.72	0.82	1.00	0.93	1.03	1.20
σ_{n-1}	0.38	0.51	0.49	0.52	0.78	0.59
CV (%)	53	62	49	56	76	49
ZONA NORTE - SEM VERTICAL (CE_e, dS/m)						
Fecha	05-88	10-88	02-89	07-89	10-89	06-90
Media	0.82	1.03	1.14	1.00	1.32	1.42
σ_{n-1}	0.42	0.51	0.54	0.54	0.70	0.68
CV (%)	52	50	47	54	53	48
ZONA SUR - SEM HORIZONTAL (CE_e, dS/m)						
Fecha	05-88	10-88	02-89	07-89	10-89	06-90
Media	0.67	0.76	0.91	0.86	0.98	0.97
σ_{n-1}	0.32	0.43	0.52	0.47	0.59	0.50
CV (%)	47	57	57	54	60	51
ZONA SUR-SEM VERTICAL (CE_e, dS/m)						
Fecha	05-88	10-88	02-89	07-89	10-89	06-90
Media	0.86	1.04	1.03	0.91	1.06	0.95
σ_{n-1}	0.44	0.51	0.50	0.51	0.60	0.50
CV (%)	51	49	49	56	57	52

Los mapas de isólinas de la CE_e que se presentan en las Figuras 17 a 22 permiten visualizar la variación espacial y temporal de la CE_e , así como las zonas más críticas o con riesgo potencial de salinidad para los suelos. En principio, la zona norte presenta valores más altos (CE_e estimadas superiores a 8 dS/m), una distribución más heterogénea de la CE_e y con un cierto incremento de la misma hacia el centro de la val (punto natural de drenaje). La zona sur presenta una distribución más homogénea de la CE_e , con varias áreas de mayor salinidad concentradas junto a las laderas que la limitan. Si se exceptúan estas áreas aisladas, puede observarse también cierto incremento de la CE_e hacia el centro de la val. En el futuro, estos mapas, junto con la calibración multitemporal y multiespacial del SEM en la zona de estudio, deben servir de base para establecer las pautas y

tendencias de salinización de la zona de estudio y, en su caso, deben servir de referencia para el diseño más apropiado de la red de drenaje y de las áreas donde es preciso incrementar la fracción de lavado para el control de la salinidad.

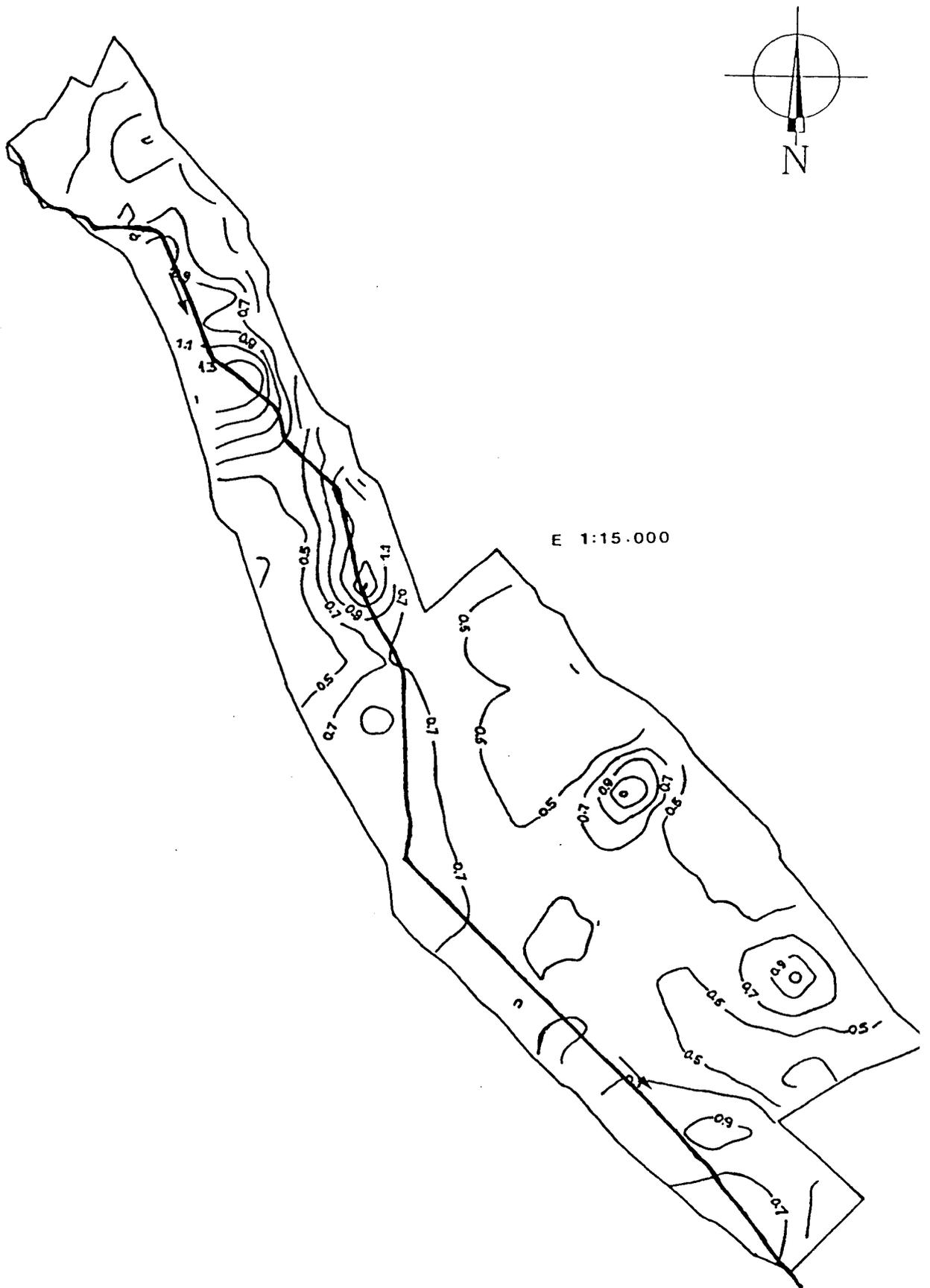


Figura 17. Isolíneas de CE_e (dS/m) obtenidas mediante lecturas del SEM horizontal en Mayo de 1988.

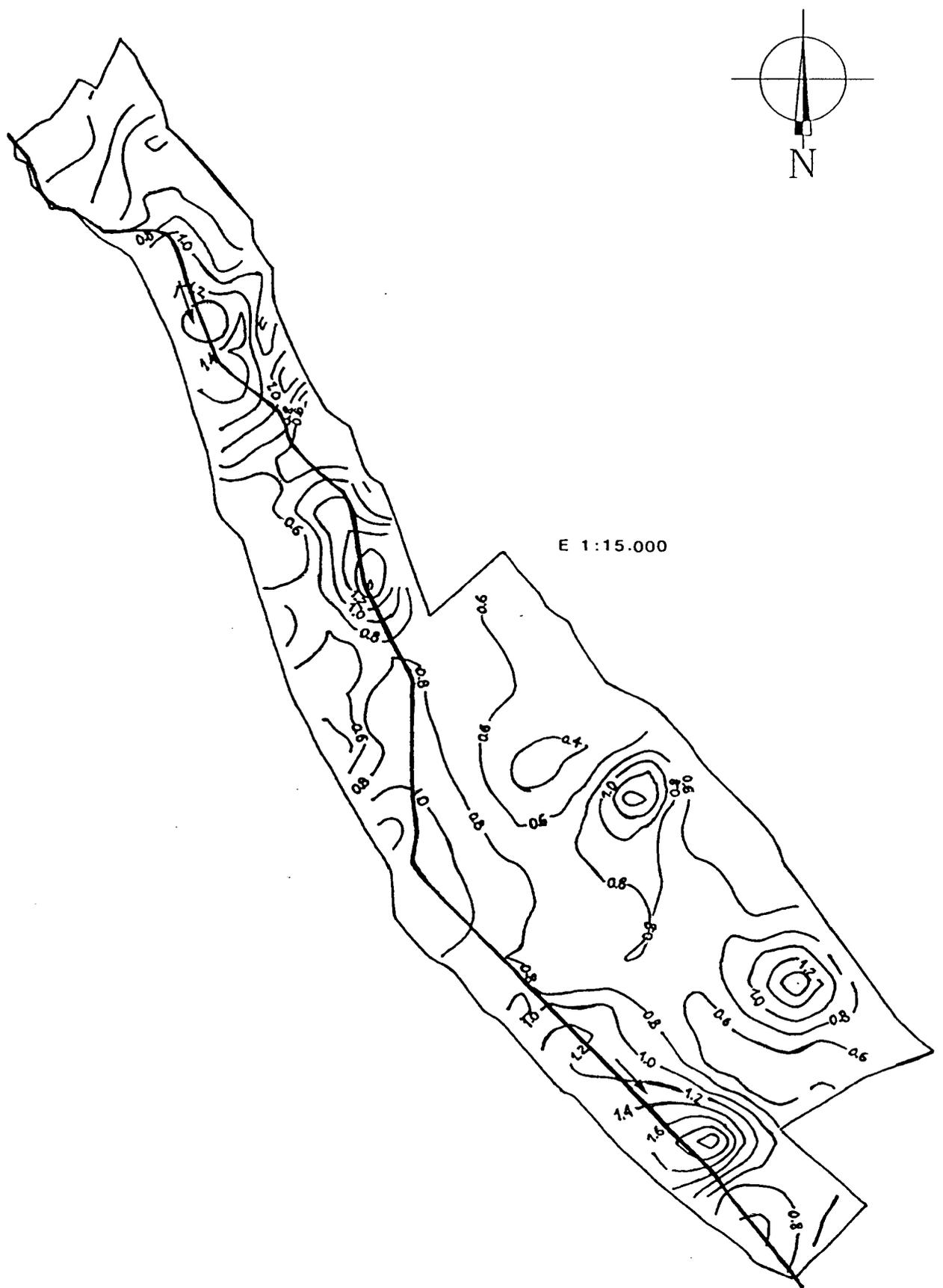


Figura 18. Isolíneas de CE_v (dS/m) obtenidas mediante lecturas del SEM vertical en Mayo de 1988.



Figura 19. Isolíneas de CE_e (dS/m) obtenidas mediante lecturas del SEM horizontal en Julio de 1989.



Figura 20. Isolíneas de CE_v (dS/m) obtenidas mediante lecturas del SEM vertical en Julio de 1989.

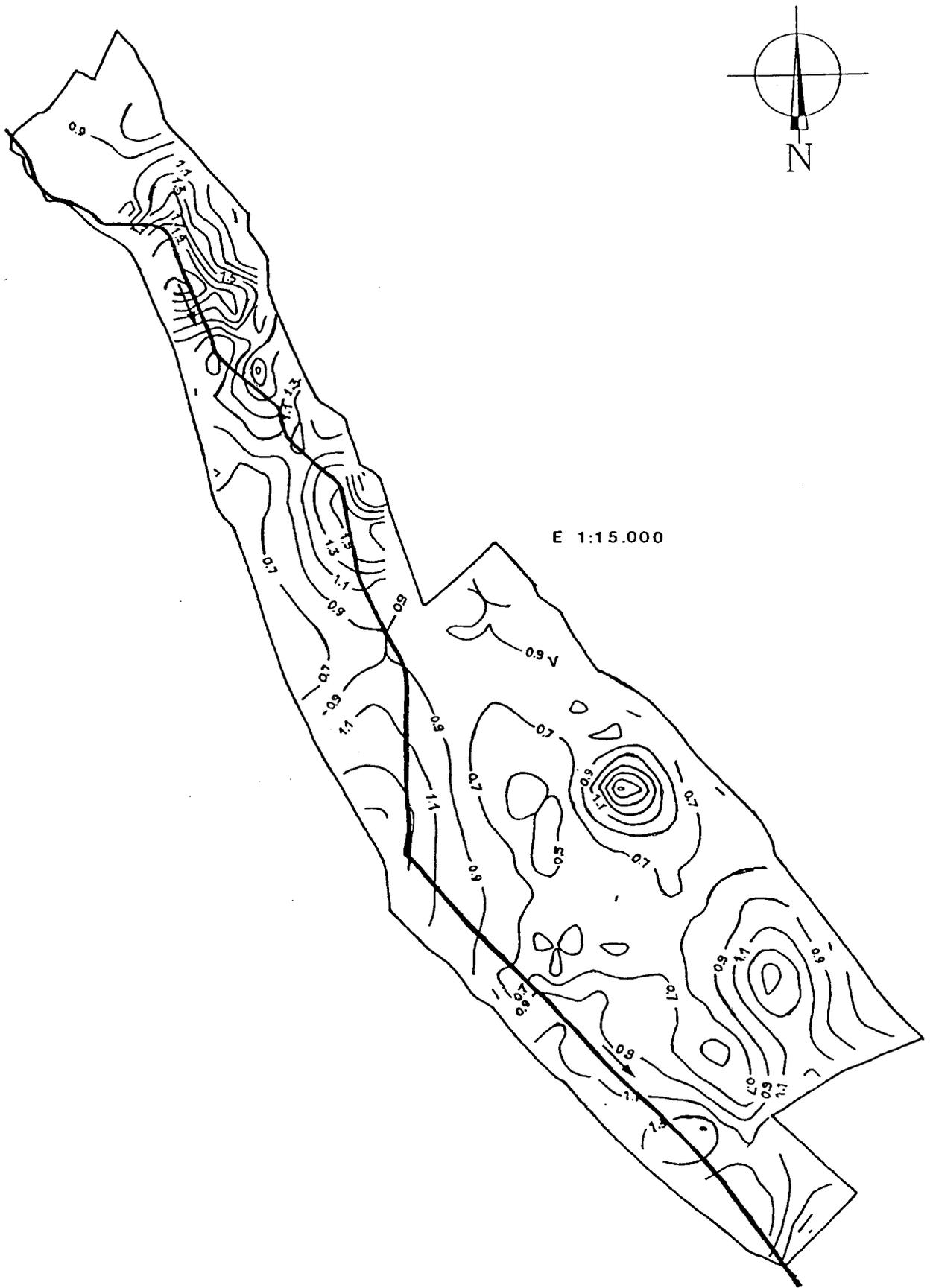


Figura 21. Isolíneas de CE_e (dS/m) obtenidas mediante lecturas del SEM horizontal en Junio de 1990.

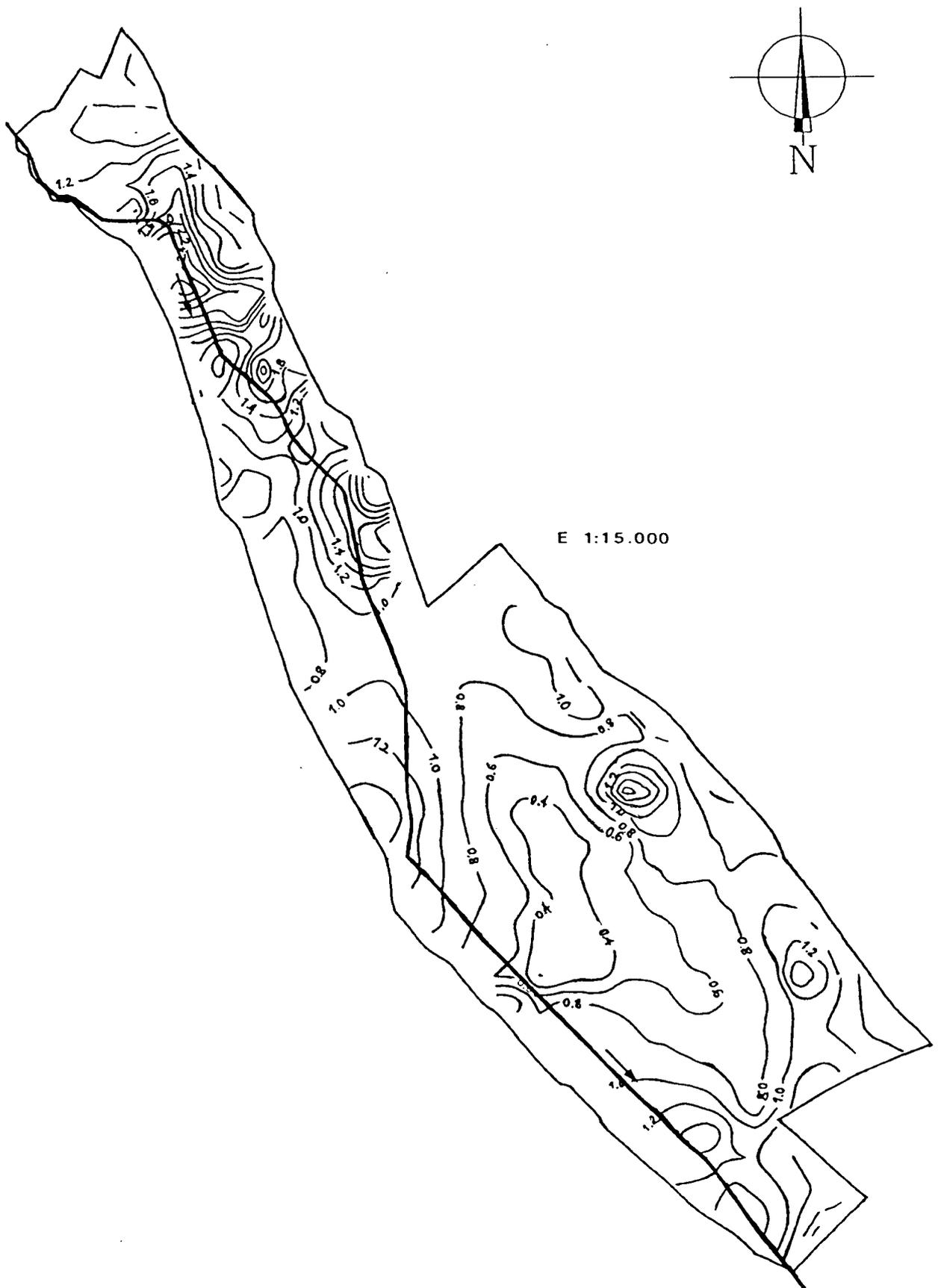


Figura 22. Isolíneas de CE_e (dS/m) obtenidas mediante lecturas del SEM vertical en Junio de 1990.

4. GEOLOGIA

4. GEOLOGIA

4.1. INTRODUCCION

En este capítulo el interés se centra en profundizar en el conocimiento de las características, distribución espacial y localización de las formaciones geológicas y de los materiales que las integran, dada la influencia de dichas variables sobre la salinidad de los suelos y de las aguas superficiales y subterráneas en el área de estudio de Monegros II.

Para ello, se ha efectuado en primer lugar (1) una revisión bibliográfica de los trabajos geológicos realizados en el Sistema Monegros II, (2) una cartografía geológica a escala 1:50.000 (ya que no existía en el área de estudio cartografía a esta escala), en la que se ha revisado la cartografía de Quirantes (1978) y se han subdividido las formaciones geológicas definidas por este autor en tramos con la terminología Magna y (3) una caracterización litológica de los materiales de cada una de las formaciones geológicas definidas en la cartografía, a través de la descripción de series estratigráficas y columnas litológicas de los sondeos efectuados en este estudio. La descripción ha sido completada con la observación al microscopio de estos materiales en láminas delgadas de algunas de las muestras obtenidas en los sondeos.

En segundo lugar, se han efectuado en laboratorio distintos ensayos de disolución de los principales materiales litológicos, al objeto de conocer la cantidad de sales solubles que contienen y su composición iónica. Esta información puede contribuir a (1) dilucidar la aparente paradoja de una elevada homogeneidad geológica del Sistema Monegros, que contrasta con una gran diferenciación química de las aguas subterráneas, (2) establecer la aportación potencial de sales solubles de cada material y (3) conocer mejor la influencia de la geología sobre la salinidad de los flujos de retorno de agua de este sistema.

Finalmente, se ha utilizado el dispositivo Wenner de medida de la resistividad eléctrica del suelo y subsuelo, al objeto de intentar estimar a partir de estas medidas la profundidad de las aguas subterráneas. Ello permitiría en el futuro controlar dichas profundidades en puntos críticos no controlados por pozos y piezómetros, cuestión de singular importancia para el éxito de la transformación en regadío de Monegros II.

En resumen, los objetivos planteados en este capítulo son los siguientes:

(1) Síntesis de la localización y distribución de las formaciones litológicas mediante la revisión de las cartografías existentes. Determinación de la naturaleza de los materiales litológicos y su distribución en las series cartográficas.

(2) Determinación del contenido en sales solubles y composición iónica de los diferentes materiales litológicos. Efecto del tamaño de grano y de la composición química del disolvente.

(3) Valoración de la fiabilidad y precisión del método Wenner para la detección de los niveles freáticos. En su caso, diseño de una red de control para establecer la evolución

espacio-temporal de los niveles freáticos en el proceso de implantación del regadío en Monegros II.

4.2. REVISION BIBLIOGRAFICA

4.2.1. Geología.

Los primeros trabajos geológicos conocidos corresponden a la segunda mitad del s. XIX. No se sitúan en el área concreta de estudio, sino que hacen referencia a aspectos geológicos regionales cuyo interés merece la pena destacar (Maestre, 1845; Martín Donayre, 1873; Palacios, 1892; Mallada, 1878). Finaliza el siglo con algunos trabajos relevantes de datación y cartografía del Terciario en la Depresión del Ebro.

En el presente siglo se han realizado estudios sobre aspectos concretos de la geología en Monegros y un buen número de trabajos recopilados exhaustivamente en la tesis doctoral de Quirantes (1978).

Los estudios con fines hidrológicos e hidrogeológicos son menos numerosos, ya que el área no se incluye en los informes que el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) ha realizado en la Cuenca del Ebro (1982). Asimismo, otros organismos dedicados a la investigación hidrogeológica o a la realización de sondeos para abastecimientos urbanos o industriales (Servicio Geológico de Obras Públicas ,SGOP; Diputación Provincial de Zaragoza, DPZ; IRYDA, etc.) desestimaron este área como fuente de suministro de agua.

Sin embargo, la existencia de aguas subterráneas al sur de la Sierra de Alcubierre era bien conocida y de allí la proliferación de pozos en el área. Debido a su alta salinidad, estas aguas eran utilizadas fundamentalmente para el ganado y en labores de limpieza doméstica.

A principios del siglo XX se llevan a cabo estudios estratigráficos de interés al amparo de las cartografías que en la época se estaban realizando (Sánchez Lozano, 1919; Peña y Braña, 1932). Los trabajos pasan a centrarse en el Terciario continental (Hernández Pacheco 1921; Romero, 1922; Marín, 1945) y en los estudios de formación de la Depresión del Ebro, que se llevaron a cabo por numerosos investigadores extranjeros (Richter y Teichmüller, 1933; Ashauer et al, 1935).

Todos estos trabajos son sintetizados con acierto por Marín (1945) y Sáenz (1929-1942), dando lugar a una primera hipótesis sobre la historia geológica de la Depresión del Ebro.

Los antecedentes sobre sedimentología y estratigrafía de la Depresión del Ebro, citados asimismo en la tesis de Quirantes (1978) por su especial interés, son los de Alastrué (1954-1958), Ríos (1959), Solé (1959) y Pinilla (1966).

Otros aspectos de la historia geológica de la Depresión del Ebro han sido abordados en la última mitad del presente siglo. Así, la estructura y tectónica del área se han descrito en los trabajos de Crusafont et al. (1966), Bomer y Riba (1962), y Riba y Pérez Mateos (1961).

Los trabajos relacionados con la petrología y sedimentación química de los materiales terciarios de la Depresión son numerosos. Entre ellos, caben destacarse los realizados por Calvo et al. (1978), Fernández Nieto y Galán (1979), Llamas (1959), Mandado (1979), Mandado y Tena (1980), Mingarro et al. (1981), Navas (1983), Ortí y Pueyo (1977), Pueyo (1978-1979, 1980), Torras y Riba (1968) y Torras (1976).

La geomorfología del área ha sido abordada tanto por geógrafos como por geólogos. La contribución de los primeros ha sido especialmente relevante en la zona central de la Depresión. Casas et al. (1945) realizaron una recopilación geográfica de Aragón y, con posterioridad (Casas, 1952), una interesante descripción de la geografía del Valle del Ebro.

Dantín (1940-1942) se ocupa por primera vez en profundidad del endorreísmo aragonés y Ferrer y Mensua (1956), Ferrer (1960), Mensua e Ibáñez (1977) e Ibáñez y Mensua (1976) describen las formas del relieve del centro de la Depresión del Ebro, realizando importantes aportaciones.

El cuaternario de la Depresión en Aragón está ampliamente estudiado en una síntesis realizada por Alberto et al. (1984).

En los años 80, encuadrada dentro de una tesis doctoral (Cuchi, 1986) dedicada al estudio de los suelos salinos, se efectuó una primera localización e inventario de los pozos situados en las áreas endorreicas. Los análisis químicos de sus aguas, muestreadas en 1977 y 1979, mostraron la elevada salinidad de las mismas.

El proyecto de puesta en regadío de Monegros II ha desencadenado una serie de estudios que tienen en las aguas subterráneas su objetivo principal. Un primer informe encargado por IRYDA en 1986 puso de manifiesto la presencia generalizada en el área de un nivel piezométrico muy próximo a la superficie que ponía en peligro la implantación del riego en ciertas áreas incluidas en el polígono de riego.

Previamente a este estudio, el IRYDA (1985) realizó un estudio de impacto ambiental de puesta en regadío del polígono Monegros II; las conclusiones no omiten el peligro de un ascenso de capa freática y una consecuente salinización de los suelos. En 1989, un nuevo estudio de impacto ambiental encargado por el MOPU, basándose en la recopilación y análisis de datos existentes, concluye que el riesgo de salinización de los suelos es alto y predice un anegamiento de las cubetas endorreicas.

Historia geológica.

El desarrollo de la actual Depresión del Ebro está ligado a las fases tectónicas de formación de las dos principales cadenas montañosas que la limitan: La Cordillera Ibérica y la Cordillera Pirenaica.

Durante la Orogenia Alpina (principalmente en el Paleogeno), la cuenca del Ebro (C.E.) era una cuenca marginal entre los Pirineos, la Cordillera Ibérica y la Cordillera Costero Catalana. A lo largo del Paleogeno los Pirineos se elevan, mientras que la Cordillera Ibérica actúa como una cordillera intracontinental con fases, con un dispositivo tensional NO-SE y otras fases de plegamiento, al igual que la Cordillera Costero Catalana, que sufre un conjunto de plegamientos y empujes de dirección E-O (Guimerá, 1984). Aunque la sedimentación en la cuenca estuvo controlada por la influencia pirenaica, la

actividad de la tectónica en la Ibérica y las Catalánides modifican notablemente la distribución y características de las facies.

Durante el Terciario tuvo lugar una sedimentación marina inicial, un tránsito marino-continental y, finalmente, una importante fase de sedimentación continental. A pesar de que numerosas hipótesis sostenían que los importantes espesores de sedimentos terciarios descansaban directamente sobre un núcleo paleozoico, los sondeos mostraron la existencia de una cobertera mesozoica en extensas áreas. Esta cobertera, mayoritariamente correspondiente al Trías, parece indicar una emersión del área que permitiera una eficaz denudación durante la mayor parte del Mesozoico e incluso durante el Terciario Inferior. Esta denudación no fue homogénea en toda la cuenca: en la zona Norte fue más intensa que en el Sur. A partir de la Orogenia Alpina comienza el tránsito marino-continental, que no es isocrono sino que comienza en Cataluña (Luteciense) para finalizar en Navarra en el Eoceno Superior. En las áreas marginales se implanta una potente sedimentación detrítica que cubre los sedimentos marinos y evaporíticos anteriores. Durante la regresión que dio como resultado el citado tránsito sedimentario, se produjo también una inversión de los aportes sedimentarios. En principio, los aportes llegaban únicamente del Sur y Sureste y con la formación de las cadenas Ibérica, Pirenaica y Costero Catalana se crean nuevas áreas-fuente, ocasionando unos aportes bilaterales (Riba y Pérez Mateos, 1961).

Durante el Paleoceno y Eoceno la Cuenca del Ebro estaba conectada con el Océano Atlántico y el ambiente marino estaba ampliamente impregnado en las áreas del norte de la cuenca. Más tarde, en el Oligoceno Inferior, la cuenca se convierte en una cuenca cerrada con sedimentación continental terrígena.

Durante el Oligoceno y Mioceno se mantiene la situación descrita en cuanto al carácter y origen de la sedimentación. Se acentúa el carácter endorreico de la cuenca, mientras tienen lugar fases de levantamiento y subsidencia. Todo ello sucede en dos subcuencas separadas por una zona central aragonesa menos subsidente. Riba (1964) sostiene que a comienzos del Mioceno empieza a ser importante la subsidencia en la zona aragonesa, mientras se han hecho notar importantes fases de plegamiento en las subcuencas adyacentes (Catalana y Navarra).

Aunque el Oligoceno y Mioceno en la parte central de la cuenca se presentan en una serie concordante y horizontal, en los bordes de la misma varias discordancias permiten distinguir fases de sedimentación.

Al iniciarse el Mioceno, la influencia del gran volumen de aportes procedentes del Norte desplazan el eje de la cuenca hacia el Sur, próximo al actual cauce del río Ebro. En éste se produce un basculamiento de la cuenca por levantamiento del área oriental; simultáneamente, el clima se torna más árido y tiene lugar una intensa evaporación y una sedimentación en régimen lagunar. Al final del Mioceno hay un cambio climático a condiciones húmedas y la anterior sedimentación evaporítica deja paso a una sedimentación carbonatada que finaliza en el Pontiense.

La colmatación de la cuenca y la creación de una importante red fluvial con energía para incidir en las plataformas calcáreas provoca un cambio en sus condiciones. El paso de condiciones endorreicas a exorreicas tuvo lugar durante el Plioceno.

Sistema Monegros.

La mayor parte de la historia geológica correspondiente a este sistema está incluida en la de la Depresión que la alberga. Sin embargo, el Sistema Monegros posee aspectos característicos que han interesado a diferentes autores (Quirantes, 1978; Birnbaun, 1976; -Slater, 1977; Cabrera, 1983).

El Sistema Monegros es el resultado de un sistema deposicional implantado en el interior de una cuenca. Se presentan importantes espesores de secuencias lacustres originadas desde el Oligoceno al Mioceno Inferior; hacia el O la deposición lacustre se prolonga hasta el Mioceno Medio (Quirantes, 1978; Birnbaun, 1976). El grupo de facies lacustres y sus relaciones estratigráficas con las facies aluviales y fluviales muestran que el sistema lacustre de Monegros registra el desarrollo de una marisma pantanosa poco profunda y lagunas que se originaron en el estadio endorreico de evolución de la cuenca del Ebro.

La evolución del sistema lacustre presenta estadios sucesivos de expansión y reducción, registrados en las secuencias sedimentarias estudiadas por Birnbaum (1976) y Cabrera (1983), entre otros.

Las márgenes del sistema lagunar oscilan con los cambios del nivel y las variaciones de áreas activas en los sistemas aluviales y fluviales de las zonas terminales del sistema.

La extensión alcanzada por el sistema lacustre estuvo por encima de los 1.500 Km², aunque hacia el oeste fue notablemente mayor.

La amplitud de las facies carbonatadas, así como la presencia de restos fósiles de cocodrilos y peces, normalmente asociados a grupos de carofitas, gasterópodos y ostrácodos, muestran que, al menos durante algunos estados de su evolución y sobre algunas áreas, los sistemas lagunares fueron perennes. Por otro lado, algunos restos de carofitas en la actualidad, adaptadas a ambientes subacuáticos de alta salinidad, permiten suponer que el contenido salino del agua debía ser alto. Las características químicas de las aguas del lago podrían ser diferentes en distintas zonas del sistema lagunar, dependiendo de la influencia local de las aguas dulces.

El área lacustre recibía agua de los numerosos tributarios superficiales, así como del flujo de agua subterránea. El aporte de agua podría haber cambiado bajo la influencia de factores alocíclicos o autocíclicos.

Las lagunas abiertas y poco profundas estaban rodeadas por amplias franjas de zonas pantanosas y marismas, donde se desarrollaba una faja de vegetación densísima, y por grandes áreas que experimentaban condiciones de sequía. La presencia de restos fósiles de vegetación ha permitido conocer la coexistencia de estos diferentes ambientes climáticos y sedimentarios dentro del sistema lagunar. Estos restos vegetales muestran que la evolución de este sistema tuvo lugar bajo condiciones más cálidas y secas que las actuales.

Los rasgos generales de las facies lacustres y palustres del sistema han sido tomados de Cabrera (1983) y Colombo y Robles (1985). Los procesos sedimentarios y la evolución paleoambiental del complejo lacustre de los Monegros estaban muy influenciados tanto por el drenaje interno de las áreas lagunares como por sus cercanas

relaciones con los sistemas de abanicos aluviales de las zonas marginales, las cuales extendían los sedimentos terrígenos a partir de las márgenes de la cuenca.

Los factores tectónicos, sedimentarios y climáticos, unidos a los rasgos fisiográficos, llevan a unos procesos sedimentarios controlados por (1) la extensión de la contribución de la red terrígena a través de las zonas lacustres modificando las zonas de distribución de carbonatos, (2) la erosión producida por los cursos divagantes de los sistemas fluvio-aluviales que afecta principalmente a las zonas lacustres marginales y (3) la fluctuación de las orillas de la laguna causadas por ascenso y descenso del nivel del agua. Esto influirá en el desarrollo de ambientes lacustres marginales y en el contenido salino de sus aguas (Freytet, 1984).

A grandes rasgos, las secuencias del Sistema Monegros pueden ser divididas en marginales-superficiales y conjuntos de lagos distales (Ryder et al., 1976; Link y Osborne, 1978). Ambos tipos de secuencias presentan complejas interrelaciones. En el conjunto de facies han sido reconocidos ambientes deltaicos, interdeltaicos, pantanos carbonatados, lagos evaporíticos efímeros, estadios terminales de fangos y carbonatos marginales. Las transiciones verticales y laterales entre estos ambientes son rápidas, indicando cambios bruscos medioambientales. De hecho, este sistema lacustre es altamente sensible a las condiciones, repercutiendo en las fluctuaciones del proceso sedimentario y, por ello, los límites entre estos ambientes eran difusos.

Quirantes (1976) realiza la primera interpretación de la estructura, mapa morfoestructural, de la parte central de la Depresión del Ebro, donde se encuentra ubicado el Sistema Monegros. Anteriormente no se consideró este área desde ese punto de vista por suponer que se trataba de materiales horizontales (Solé, 1954); sin embargo, otros aspectos de la morfoestructura tectónica, como las deformaciones diapíricas, habían hecho eco en los estudios de Solé (1953), Bomer (1957), Riba (1962), etc.

En el mapa presentado por Quirantes aparece el área de estudio como un gran área sinclinal con terminación hacia el este y con buzamientos entre $45'$ y 3° . Los anticlinales y sinclinales son numerosos y están centrados principalmente al S y O. En el borde NE, sin embargo, se presenta un anticlinal (de La Almolda) de mayor envergadura atendiendo a la longitud de su eje (20 Km), aunque el buzamiento no supera los 6° . El eje de estos suaves pliegues posee una dirección variable N60E (anticlinal de La Almolda), O-E (sinclinal de los montes de Retuerta, N80E), NE-SO (sinclinal de Bujaraloz) y SSO-NNE (anticlinal de Peñalba). Los tres últimos son denominados por Quirantes (1978) como deformaciones de orden menor, incluyéndose también dentro de este grupo la serie de anticlinales y sinclinales situados al norte de Cinco Olivas, que se van relevando hasta una longitud de 50 Km. Además de estas deformaciones, la zona Bujaraloz-Sástago presenta una red de diaclasas con características definidas por Quirantes en su tesis doctoral. Estas se agrupan según dos direcciones preferentes que afectan a la plataforma calcárea y cuartejan los niveles superiores de las facies carbonatadas que representan los estadios finales de la red en el Sistema lacustre de Monegros. La dirección principal es NE-SO y una red secundaria presenta dirección ONO-ESE.

Geomorfológicamente, el Sistema Monegros presenta igualmente características peculiares, tanto en la evolución geomorfológica ocurrida después del Terciario como durante el Cuaternario. Dentro de la división geomorfológica que realiza Quirantes -(1) plataformas calcáreas culminantes, (2) cuestas intermedias, (3) depresiones periféricas, (4) terrazas y glacis cuaternarios, (5) vales y (6) cuencas endorreicas- el Sistema Monegros

puede considerarse representado por los grupos (1), (5) y (6). Las primeras están constituidas por calizas, margas y yesos. En nuestro caso no pueden incluirse en "las plataformas pontienses que dominan, a una altura de 600-800 m, el resto de las formas", de Ferrer y Mensua (1956), como dice acertadamente Quirantes, por falta de datación de este piso.

El término "vales" es utilizado en Aragón para denominar a los barrancos de fondo plano; con anchura desde los 5 a los 25 m y que presentan perfil transversal en artesa. En el Sistema Monegros la red de este tipo de barrancos es extensa y enormemente jerarquizada. El relleno de estas vales es generalmente material detrítico del entorno próximo y constituido por los mismos materiales sobre los que se desarrollan.

Las cuencas endorreicas están representadas extensamente en este Sistema y son objeto de un estudio más detallado en un apartado posterior.

En la distribución morfoclimática realizada por Rodríguez Vidal (1982), el Sistema Monegros aparece situado en zonas semiáridas y áridas en relación directa con la topografía y la orientación. Los procesos morfoclimáticos asociados son el arroyado y la meteorización mecánica. Un modelado intensamente disectado y acarcavado es el resultado de estos procesos, así como el endorreísmo y la salinidad asociada al mismo.

Finalmente, el Cuaternario del área no está muy desarrollado, limitándose al relleno del fondo de vales y lagunas y a algunas placas sobre terrenos yesosos en los alrededores de Bujaraloz. Ha sido cartografiado por Quirantes (1978) y Alberto et al. (1982).

4.2.2. Salinidad de los materiales litológicos

La composición de las rocas sedimentarias tanto desde el punto de vista mineralógico como químico (Garrels y Mckenzie, 1954), el papel de la diferenciación geoquímica en el proceso sedimentario (Goldschmit, 1954; Mason, 1952), la evolución postsedimentaria y su influencia en el enriquecimiento relativo de determinados iones en las rocas, son aspectos clave en el estudio de la relación de la calidad de las aguas (superficiales y subterráneas) con la litología. Así como el contenido mineralógico de los materiales litológicos ha sido uno de los principales temas de interés para muchos geólogos y geoquímicos, la composición iónica de las principales rocas sedimentarias es menos conocida y puede ser sólo aproximada (Hem, 1985). Los estudios experimentales de interacción roca-agua son más infrecuentes debido a la dificultad de alcanzar el equilibrio. La enorme dificultad de reproducir experimentalmente las condiciones reales han desviado estos estudios hacia trabajos en los que se realizan cálculos y valoraciones de especiación a partir de análisis iónicos completos.

La solubilidad del yeso y del carbonato en agua y en otras soluciones acuosas salinas ha sido investigada en múltiples trabajos (Tanji et al, 1966; Gobran y Miyamoto, 1985; Suarez y Rhoades, 1982). Además de los desarrollos teóricos sobre la solubilidad de estos minerales, se han efectuado estudios experimentales de sus tasas de disolución (Kemper et al, 1975; Keren y Shainberg, 1981; Liu y Nancollas, 1971; Keren y O'Connor, 1982), de la influencia de las concentraciones de determinados iones (Tanji, 1969; Nakayama, 1971), del tamaño de la partícula (Kemper et al, 1975) y del espesor de la capa

difusa alrededor de las partículas de yeso (Barton y Wilde, 1971).

El contenido iónico y mineralógico de las litofacies de la Cuenca del Ebro ha sido abordado por algunos autores: Pinilla (1966), Quirantes (1978), Inglés y Pueyo (1983, 1984), Mandado (1987) y Mandado y Tena (1988).

Pinilla (1966) presenta un estudio cuyo principal objetivo es la caracterización del medio sedimentario a través de los análisis químicos de las rocas. En relación a las sales solubles destaca la existencia mayoritaria de yeso junto a halita, anhidrita, glauberita y epsomita. Quirantes (1978) recoge fundamentalmente los resultados de Pinilla para reconstruir paleogeográficamente el ambiente de sedimentación de las formaciones geológicas definidas por él. Sus aportaciones sobre el contenido de sales solubles de los materiales litológicos (yesos y calizas) son escasas. Pinilla y Riba (1972) realizan un estudio de los carbonatos presentes en las lutitas y de las sales solubles presentes en los sedimentos terciarios, señalando el elevado contenido en comparación con las mismas litologías depositadas en otras épocas geológicas. Finalmente, Mandado (1979, 1987) presenta un estudio geoquímico de las litofacies yesíferas del sector aragonés de la Cuenca Terciaria del Ebro.

La influencia de la meteorización química del agua ha sido estudiada por Keller (1957) en silicatos, mientras Drever (1982) presenta resultados en una amplia gama de litologías.

La asociación de una determinada composición de las aguas superficiales o subterráneas con una roca determinada está siendo recientemente la vía más utilizada para el estudio de la interacción roca-agua. En rocas evaporíticas son numerosos los trabajos de identificación de las sales cuya meteorización da lugar a distintas composiciones iónicas de las aguas en equilibrio con ellas (Navas, 1989).

En la mayoría de las rocas sedimentarias, la caracterización desde un punto de vista químico es escasa y en ocasiones poco satisfactoria, debido a la complejidad derivada de una gran variabilidad mineralógica y de condiciones sedimentarias y postsedimentarias; sin embargo, la mayoría de las aguas subterráneas y superficiales están asociada a las rocas sedimentarias durante la mayor parte del ciclo hidrológico.

Los estudios de relación litología-calidad química del agua en la Cuenca del Ebro se limitan a los realizados por Alberto y Navas (1986) y Navas (1989). Alberto y Navas (1986) atribuyen a las formaciones evaporíticas del centro de la cuenca un papel preponderante en la salinización de las aguas superficiales, pues la cartografía detallada de las litofacies yesíferas aflorantes se correlaciona satisfactoriamente con los niveles de salinidad en las aguas superficiales. El análisis de la composición química de los materiales litológicos del Terciario para conocer cuantitativa y cualitativamente su aportación a las aguas ha sido menos numerosa y es prácticamente inexistente al margen de los autores citados en los párrafos anteriores.

4.2.3. Prospección geoelectrica Wenner

La prospección geoelectrica ha sido utilizada desde principios de siglo para obtener

un conocimiento adicional de determinadas características del subsuelo. Con este objetivo fueron desarrollados varios métodos que comprenden una gran variedad de técnicas, tanto en las fuentes que utilizan (naturales o artificiales) como en las disposiciones electródicas aplicadas. El método eléctrico constituye uno de los cuatro grupos principales entre las técnicas de exploración geofísica.

La aplicación más importante de los métodos geoelectrónicos es el sondeo eléctrico vertical (S.E.V.). Esta técnica requiere de unas condiciones de aplicación que restringen su uso por las dificultades de interpretación de los datos obtenidos. La finalidad del S.E.V. es la determinación del nivel de las aguas subterráneas y de las resistividades o conductividades de las mismas mediante mediciones realizadas en superficie. A pesar de sus limitaciones, es una de las técnicas más empleadas en hidrogeología.

Los requisitos para la aplicación de esta técnica son resumidos por Granda (1986): (1) el modelo geológico involucrado debe estar constituido por capas planas; (2) dichas capas deben disponerse horizontalmente y con una extensión lateral teóricamente infinita respecto a la apertura máxima del dispositivo electródico de medida y (3) las relaciones espesor-resistividad entre las diferentes capas deben ser suficientes para permitir la detección de las mismas.

La mayoría de los métodos geoelectrónicos requieren del uso de cuatro electrodos clavados en el suelo. Los diversos dispositivos difieren únicamente en la posición relativa de los cuatro electrodos. El par de electrodos externo introduce una corriente eléctrica en el terreno, mientras que el segundo par mide la diferencia de potencial que se establece entre ellos como resultado del paso de la corriente eléctrica.

Los métodos más difundidos son los de Schlumberger y Wenner. El dispositivo de Schlumberger presenta, respecto del dispositivo de Wenner, la ventaja de ser menos sensible a las heterogeneidades laterales, pero tiene la desventaja de necesitar de una corrección de los datos de campo antes de su interpretación y exige además de una mayor sensibilidad de la instrumentación.

El método Wenner ha sido muy utilizado por la simplicidad de su instrumentación y facilidad de manejo. No obstante, su sensibilidad a las heterogeneidades laterales y su menor rapidez de trabajo, junto con una falta de rigor científico en la interpretación de las curvas, ha hecho declinar su uso. Sin embargo, Orellana (1967) defiende la interpretación cuantitativa del método Wenner aludiendo a la existencia de numerosas colecciones de curvas patrón para este dispositivo.

Si se toman las debidas precauciones, el dispositivo Wenner permite obtener resultados fiables, especialmente si se considera la influencia del contenido de agua y su salinidad sobre la resistividad de la roca.

Esta consideración ha hecho del método Wenner una técnica efectiva para determinar la salinidad del suelo (Read y Cameron, 1979; Rhoades e Ingvalson, 1971), localizar los niveles freáticos (Hanson y Grismer, 1987; Cantos, 1953) y detectar las áreas de descarga salinas (Rhoades y Halvorson, 1977; Brown et al, 1983; Cherkauer et al., 1987).

Rhoades e Ingvalson (1971) aplicaron el método Wenner para estimar la salinidad del suelo a través de cuatro modelos de cálculo de la CE aparente del suelo a partir de los

datos de resistencia eléctrica. Read y Cameron (1979) aplicaron este método a áreas salinas en las regiones áridas de las praderas canadienses. De sus ensayos en varios tipos de suelo y con diferentes contenidos de humedad, concluyeron que el método es útil para establecer mapas de salinidad del suelo en un amplio intervalo de condiciones de campo. Dichos autores obtuvieron elevadas correlaciones entre la CE estimada por prospección eléctrica y la medida en el extracto de saturación del suelo, siempre que las lecturas con el dispositivo Wenner se efectúen a una humedad de referencia ("capacidad de campo"). Halvorson y Rhoades (1974) identificaron con esta técnica áreas potencialmente salinas y Read y Cameron (1979) confirmaron la utilidad del dispositivo Wenner para estimar la CE aparente del suelo en amplias condiciones de salinidad y litologías heterogéneas. Finalmente, Brown et al. (1983) demostraron la utilidad de este método para la detección temprana de la salinidad y para el diagnóstico de las filtraciones salinas.

Otra de las aplicaciones del dispositivo Wenner es la estimación de los niveles freáticos. Así, Halvorson y Rhoades (1976) utilizaron esta técnica para estimar la profundidad del nivel freático en áreas contiguas a filtraciones laterales salinas con el objetivo de identificar posibles áreas de recarga, concluyendo que las lecturas obtenidas son sencillas de interpretar en el caso de sistemas de dos capas, pero muy complicadas en sistemas multicapa con capas delgadas. En este último caso, recomiendan el sistema de refracción sísmica como complemento a la prospección geoelectrónica. Benz et al. (1976) obtienen resultados erráticos causados por la salinidad del agua subterránea cuando utilizan curvas acumulativas de resistividad y no obtienen una buena correlación entre las medidas de resistividad y las litologías atravesadas. Hanson y Grismer (1987) utilizaron el mismo método para realizar prospecciones en transectos de 8.000 m, con una separación interelectrónica de 15 m, pero la CE aparente obtenida fue considerada poco representativa. Finalmente, Brown et al (1983) utilizaron esta técnica para estimar la profundidad del nivel freático mediante representación gráfica de la CE aparente acumulada frente al espaciado interelectrónico, de tal manera que un cambio en la pendiente de esta curva correspondía generalmente con la presencia de dicho nivel.

En el área de estudio, el único trabajo realizado con el método Wenner se remonta a las investigaciones que el Instituto Geológico y Minero de España realizó en 1952. Su objetivo era detectar aguas subterráneas para el abastecimiento humano (Cantos, 1953). Las S.E.V. permitieron localizar zonas en las que el nivel freático estaba próximo a la superficie (3-10 m) pero sólo en contadas ocasiones estas aguas reunían las condiciones mínimas de salubridad, dadas sus elevadas salinidades.

4.3. MATERIAL Y METODOS

4.3.1. Geología

Revisión cartográfica y descripción de sondeos

Una vez delimitada geográficamente el área de estudio, se ha realizado una revisión de la cartografía de Quirantes mediante fotografía aérea (vuelo USAF.B. 1975; Escala aproximada 1:33.000).

La cartografía de formaciones litoestratigráficas de Quirantes (1978; E 1:250.000) se trasladó mediante pantógrafo a la escala 1:50.000. Sobre esta cartografía se efectuó una revisión de campo en la que a cada una de las subdivisiones realizadas dentro de cada unidad litoestratigráfica se le asignó la terminología del mapa geológico nacional a esta escala (serie Magna).

Dentro de cada unidad litoestratigráfica, se localizó en el campo la serie estratigráfica más completa, esto es, aquella con el mayor número de subdivisiones cartografiadas. La localización geográfica de las series estratigráficas se presenta en la figura 23.

En la Formación Zaragoza, Miembro Yesos de Retuerta, la serie estratigráfica se realizó en el barranco de Varella La Tranca. La serie se inició a una cota aproximada de 280 m y finalizó a la cota 350. Los materiales que constituyen la parte superior del Miembro Yesos de Retuerta se describió en una pequeña serie, al N de la anterior. La serie se inició a la cota 340 y finalizó a la cota 400 m, aproximadamente.

En la Formación Alcubierre se realizaron dos series estratigráficas, en el Miembro Bujaraloz y en el Miembro Calizas de Peñalba. La serie del Miembro Bujaraloz tiene situado el muro en la cota 220 y el techo en la cota 345 m. La serie de Calizas de Peñalba tiene aproximadamente unos 120 m, con la base situada a cota 240 m y el techo a 360 m. Las calizas de Sigena ocupan una pequeña parte del área de estudio, forman parte de la Formación Alcubierre aunque estratigráficamente se sitúan debajo. Están constituidas por calizas en bancos potentes.

En la Formación Calizas de Mequinenza, Miembro Los Arcos, se realizó una serie de 140 m, con el muro a cota 180 m y el techo a cota 320 m.

La Formación Caspe se describió en una pequeña serie al sur del área de estudio. No se han obtenido series que superen los 140 m, siendo el término medio de unos 80 a 100 m.

A la descripción de los materiales en las series estratigráficas se ha unido la descripción de los materiales obtenidos en la perforación de los sondeos. La descripción se presenta en las fichas de los sondeos (Anexo 3), en las que figuran las cotas de inicio y fin de la perforación, su localización en coordenadas UTM, las principales características de los materiales litológicos, el color, la localización de las muestras recogidas para la realización de las láminas delgadas y para el análisis de las sales solubles, las características litológicas del acuífero, los niveles acuíferos detectados durante la perforación y el nivel freático estacionario.

Los sondeos se realizaron en dos fases. En la primera fase (Noviembre 1986-Enero 1987), se efectuaron diez sondeos localizados en zonas sin datos litológicos ni hidrogeológicos previos. En la segunda fase (Enero 1989-Junio 1989), se efectuaron dieciséis sondeos localizados en dos zonas endorreicas de gran extensión situadas al sur de Bujaraloz (seis sondeos en Hoyo Benamud, y diez sondeos en Hoyo Agustín). En el Hoyo Agustín se perforó a rotación, a finales de 1989, un nuevo sondeo de casi 120 m que está situado junto a uno de los sondeos de la segunda fase.

Todos los sondeos se realizaron a rotación, con doble tubería y obtención de testigo continuo. El diámetro final de entubación fue de 75 mm y el tubo exterior de 80 mm. Los

sondeos están protegidos con un cilindro de hierro anclado al suelo mediante un dado de hormigón y cerrados con una tapa metálica con candado.

Los primeros sondeos fueron descritos a medida que la perforación iba avanzando. En la segunda fase la descripción se realizó una vez completada la perforación de los dieciséis sondeos. Todos los datos significativos figuran en las fichas correspondientes (Anexo 3).

Láminas delgadas

En los sondeos de la primera fase se seleccionaron doce muestras de testigo representativas de los principales materiales litológicos obtenidos en la perforación. De las muestras seleccionadas se realizaron láminas delgadas. La situación de las muestras en la serie estratigráfica se refleja en las fichas de sondeos.

Para la elaboración de las láminas delgadas se utilizaron las muestras orientadas de testigo continuo de sondeo. Estas muestras se cortaron, mediante sierra circular de diamantes lubricada con agua, en secciones de 1 cm de grosor. Posteriormente se desgastó una de las caras de la sección con carburo de silicio (carborundo) de tamaño de grano progresivamente decreciente. Una vez plana, la cara pulida se lavó para quitar el abrasivo. A continuación se realizó el esmerilado del "porta" en la cara en que se pega la sección recién pulida. El pegado se efectuó por medio de resinas tipo "Lakeside". La muestra se cortó de nuevo con una sierra de diamantes de mayor precisión para dejarla del mínimo espesor posible, se desgastó con carborundo y agua hasta obtener un espesor de 0.03 mm y se cubrió con un "cubre", pegado con "Bálsamo de Canadá".

La descripción de las láminas delgadas se realizó con un microscopio JENAPOL, centrándose principalmente en los aspectos de composición mineralógica, textura, porosidad y actividad orgánica.

4.3.2. Salinidad de los materiales litológicos

Para la determinación del contenido en sales solubles de los materiales litológicos se utilizaron muestras obtenidas del testigo continuo extraído durante la perforación de los sondeos.

Dichos sondeos se realizaron en tres Formaciones litoestratigráficas: (1) Zaragoza (Miembro Yesos de Retuerta), (2) Alcubierre (Miembro Bujaraloz) y (3) Calizas de Mequinenza (Miembro Los Arcos). En cada una de estas formaciones se obtuvieron muestras de los diferentes materiales geológicos: lutitas, calizas, margas y yesos. Los materiales con la notación 1 se obtuvieron en el sondeo 1, situado en el Miembro Yesos de Retuerta; los materiales con la notación 2 se obtuvieron en el sondeo 8, situado en el Miembro Bujaraloz, y los materiales con la notación 3 se obtuvieron en el sondeo 3, situado en el Miembro Los Arcos. En la parte superior de este último Miembro sólo existen lutitas, calizas y yesos, por lo que no se han descrito margas correspondientes a esta formación geológica. La localización de las muestras en las columnas litológicas de los sondeos figura en las fichas de los sondeos correspondientes.

Una vez recogidos 2 Kg de muestra de cada material litológico seleccionado, se secaron, se trituraron, molieron y tamizaron por tamiz de 2 mm. Dos tercios de esta muestra básica se tamizaron por tamices de luz decreciente para obtener cuatro tamaños de grano diferente: (1) 2-1 mm, (2) 1-0.5 mm, (3) 0.5-0.25 mm y (4) 0.25-0.10 mm.

La salinidad de los materiales litológicos se determinó en tres ensayos diferentes:

(1) Ensayo 1. Disolución de los materiales litológicos en agua destilada. (1A): A una cantidad de 500 mg de muestra de tamaño inferior a 2 mm se le añadieron 100 ml de agua destilada. La solución se agitó durante cinco minutos y se midió la CE y el pH. Estas medidas se repitieron semanalmente, previa agitación, hasta obtener lecturas estabilizadas durante tres semanas consecutivas. Todos los recipientes permanecieron tapados durante el ensayo para evitar la evaporación. Sobre el filtrado de estas soluciones de equilibrio se determinaron los cationes y aniones principales según los procedimientos descritos posteriormente. (1B): A 100 ml de agua destilada se añadieron cantidades crecientes de material (< 2 mm) y, bajo agitación con un agitador magnético, se registró la evolución de la CE por medio de los electrodos de medida apropiados introducidos en la solución y un registrador de papel continuo. Antes de adicionar una nueva cantidad de material se dejaba que la solución llegase a equilibrio con el material previo adicionado.

(2) Ensayo 2. Efecto del tamaño de grano sobre la tasa de disolución de los materiales litológicos en agua destilada: Para cada material litológico (< 2 mm) se mezclaron cantidades iguales procedentes de cada Formación y se tamizó la mezcla resultante para obtener los cuatro tamaños de grano mencionados; 50 mg de muestra de cada material litológico (lutita, caliza, marga y yeso) y tamaño de grano, se añadieron a 100 ml de agua destilada y se midió la CE bajo agitación cada 5 minutos por un período de una hora.

(3) Ensayo 3. Efecto de la composición química del disolvente sobre la disolución de los materiales litológicos: 500 mg de muestra (< 2 mm) de cada material (lutita, caliza, marga y yeso) de las tres Formaciones litoestratigráficas se añadieron a 100 ml de cada uno de los siguientes disolventes: (1) agua destilada (CE < 0.001 dS/m), (2) agua del canal de Monegros muestreada en la boca sur del túnel de Alcubierre el día anterior al comienzo del ensayo con esta solución (Tabla 17), (3) agua salina (NaCl de CE = 5.8 dS/m), (4) agua saturada en yeso y (5) agua saturada en calcita. Las soluciones (1) a (5) fueron analizadas químicamente. Diariamente se midió, previa agitación, la CE y el pH de cada disolución. Una vez alcanzado el equilibrio, se determinaron los aniones y cationes sobre las soluciones previamente filtradas.

Tabla 17. Principales características químicas del agua del canal de Monegros (salida sur del túnel de Alcubierre).

CE	Ca	Mg	Na	HCO ₂	SO ₄ *	Cl
dS/m	meq/L					
0.31	1.66	0.99	0.29	1.92	0.62	0.40

* estimado por diferencia.

La distribución de las especies inorgánicas disueltas y el cálculo de las actividades iónicas y de los índices de saturación de las soluciones con respecto a los minerales más relevantes se han estimado, en cada una de las soluciones con análisis iónicos, por medio del programa WQ4F, que es una versión avanzada del modelo de equilibrio WATEQ de Truesdell and Jones (1974).

El modelo SOILCHEM (Sposito and Coves, 1988) se aplicó a algunas soluciones al objeto de contrastar los resultados de ambos modelos que, en general, fueron muy similares. La selección de WQ4F se debió a que es un programa más interactivo que SOILCHEM y a que proporciona salidas de los minerales con sus índices de saturación, en tanto que en SOILCHEM dicha información debe calcularse a partir de las salidas proporcionadas por el programa.

La CE se midió con un conductímetro RADIOMETER modelo CDM-83. El pH se midió con un videovalorador RADIOMETER, modelo VIT-90. Los carbonatos y bicarbonatos se determinaron mediante valoración acidimétrica con el videovalorador equipado con una bureta automática ABU-91 y un muestreador automático SAC-80. Los cloruros y sulfatos se determinaron mediante cromatografía iónica con un cromatógrafo iónico DIONEX 2000 i/SP. El calcio y el magnesio se determinaron mediante espectrofotometría de absorción atómica con un espectrofotómetro PERKIN ELMER, modelo 3030 con autosampler AS-50 e impresora PR-100 (a las muestras diluidas se les añade LaCl y HCl hasta alcanzar una concentración del 1% en Lantano y 5% en ácido para minimizar los problemas de interferencias iónicas). Finalmente, el sodio se determinó mediante fotometría de llama con el mismo espectrofotómetro.

4.3.3. Prospección geoelectrica Wenner

La configuración propuesta por Wenner (1915) consiste en cuatro electrodos en línea con una distancia interelectródica (a) constante. En este dispositivo eléctrico rectilíneo y simétrico la relación entre los electrodos exteriores (A y B) y los interiores (M y N) es igual a tres. La resistividad aparente del medio atravesado por la corriente eléctrica se obtiene de:

$$\rho_a = 2\pi a \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (6)$$

donde:

ρ_a = Resistividad promedio del espesor "a" del medio (ohm cm)

a = Distancia interelectródica (cm)

$\frac{V}{I} = R_a = \text{Lectura del instrumento (ohm)}$

La corriente eléctrica se establece entre los dos electrodos exteriores clavados verticalmente en el suelo, midiéndose la caída del potencial entre los electrodos interiores clavados y alineados con los exteriores. La profundidad a la que penetra la corriente eléctrica depende de la distancia interelectródica y, en medios estratificados, de las resistividades de los distintos estratos.

Las medidas se efectuaron con un resistímetro MEGGER, modelo 63220, que dispone de un generador manual que proporciona una salida eficaz de unos 500 V, con una frecuencia de entre 10 y 20 c/seg, dependiendo de la velocidad de rotación de la manivela. Los valores entre los que puede trabajar van desde 0.3 a 30 ohm, con una precisión del $\pm 1 \%$, y la corriente eléctrica alcanza profundidades de hasta 100 m.

Las medidas se efectuaron en ocho puntos de los sectores de riego I y II, que son los primeros a transformar en regadío, y en dieciséis puntos donde se conoce con detalle la composición litológica (sondeos) y/o la profundidad del nivel freático (pozos y sondeos).

Los ocho puntos de medida de los sectores I y II estaban inicialmente en seco. Su emplazamiento responde al control de amplias vales presumiblemente receptoras del futuro drenaje de las superficies de riego en sus cuencas de recepción. Se realizaron tres campañas de medidas (17-9-87; 4-4-88; 18-7-89) efectuadas bajo condiciones de humedad del suelo de referencia ("capacidad de campo" o entre 2 y 3 días después de una lluvia importante). Durante el período de medidas, los puntos W-3 y W-4 pasaron de situación de seco a regadío. La Tabla 18 presenta las formaciones geológicas, posiciones geomorfológicas y los tipos de suelo correspondientes a cada punto de medida designados W-1 a W-8.

Los diez puntos donde se analizaron las posibles correlaciones de las lecturas de resistividad con los materiales geológicos y profundidad del agua subterránea se localizaron junto a sondeos, realizándose tres campañas de medición (13-6-87, 17-9-87 y 8-3-88). La Tabla 19 presenta las formaciones geológicas, posiciones geomorfológicas y los tipos de suelo correspondientes a cada punto de medida designados S-1 a S-10.

Finalmente, los seis puntos donde se analizaron las posibles correlaciones entre las lecturas de resistividad y los niveles freáticos se localizaron junto a pozos con niveles de agua conocidos. Las campañas de prospección se realizaron en las épocas en las que se detectaron las mayores fluctuaciones de dichos niveles (30-5-87, 17-9-87, y 4-4-88). La Tabla 20 presenta las formaciones geológicas, posiciones geomorfológicas y tipos de suelo correspondientes a cada punto de medida.

En los sectores I y II las medidas se realizaron con separaciones interelectrónicas crecientes de 1 m hasta una separación máxima de 8 m (equivalente a una profundidad de integración teórica de 8 m). En las medidas realizadas junto a pozos y sondeos la profundidad teórica alcanzada fue de 12 m. El valor de la separación interelectrónica ó profundidad integrada, se incrementó en intervalos de un metro hasta la profundidad del nivel freático. En las proximidades del nivel del agua medida en los pozos, dichos incrementos fueron de 0.50 m.

En todos los casos, los electrodos se clavaron en el suelo hasta una profundidad de 10-20 cm, en función del terreno sobre el que se realizaban las medidas.

La CE aparente (CEa, dS/m) se ha determinado a partir de la ecuación:

$$CE_a = \frac{1}{2\pi a R_s} \quad (7)$$

El análisis de los resultados se ha realizado según los métodos propuestos por Halvorson y Rhoades (1974) y Moore (1945). Halvorson y Rhoades proponen una representación gráfica de los valores de CEa frente a la distancia interelectródica "a", visualizándose de esta manera la variación de la CEa con la profundidad (a). Moore propone una representación de la CE acumulada (CE_{ac}) frente a la separación interelectródica. Este método permite detectar puntos de inflexión y la separación interelectródica a la que se produce el punto de inflexión se interpreta como la profundidad a la que está situada la capa freática.

Una vez elaborados los perfiles de CE por el método citado se han utilizado los siguientes criterios para la estimación de la posición de los niveles freáticos:

1) En las zonas de descarga se estima el nivel freático a partir de los puntos de inflexión, o de aumento de la CE, observados en la zona del perfil de descarga con una CE más o menos uniforme.

2) En las zonas de recarga se estima la posición del nivel freático a partir del perfil de recarga, en el punto donde la CE aumenta (punto de inflexión).

3) En los perfiles que no corresponden ni a zonas de recarga ni de descarga, la CE es prácticamente uniforme y la profundidad del nivel freático no es, en principio, determinable.

Finalmente, la asignación de la CE correspondiente a cada litología sólo ha sido posible en el sondeo 3, donde la potencia de determinados materiales litológicos (lutitas, yesos y calizas) ha permitido la utilización del método de Halvorson y Rhoades (1974) para determinar la conductividad de un material a partir de las conductividades a diferentes profundidades:

$$CE_{a_i - a_{i-1}} = \frac{(a_i CE_{a_i}) - (a_{i-1} CE_{a_{i-1}})}{a_i - a_{i-1}} \quad (8)$$

donde

CE_{a_i} = conductividad aparente obtenida a la profundidad i

$CE_{a_{i-1}}$ = conductividad aparente obtenida a la profundidad i-1

Tabla 18. Prospección geoelectrica Wenner: Características de los puntos de muestreo para el seguimiento de la salinidad en los sectores de riego I y II.

PUNTO MEDIDA	FORMACION GEOLOGICA	POSICION GEOMORFOLOGICA	TIPO DE SUELO
W-1	Yesos de Retuerta	Val	S, Y
W-2	Yesos de Retuerta	Plataforma	S, Y, p
W-3	Mb. Sigena	Val	S, N
W-4	Mb. Sigena	Val	P, C
W-5	Mb. Los Arcos	Plataforma	S, C, p
W-6	Mb. Sigena	Val	P, Y, N
W-7	Mb. Bujaraloz	Plataforma	S, C, P
W-8	Mb. Bujaraloz	Plataforma	S, C

S = somero

P = profundo (> 50 cm)

Y = yesos

s = sales

C = carbonatos

p = pedregosidad

N = capa freática

Tabla 19. Prospección geoelectrica Wenner: Características de los puntos de muestreo para la detección de capas freáticas y correlación con la litología.

SONDEO	FORMACION GEOLOGICA	POSICION GEOMORFOLOGICA	TIPO DE SUELO
S-1	Yesos de Retuerta	Plataforma	S,Y,p
S-2	Mb. Bujaraloz	Val	P,S,N
S-3	Mb. Los Arcos	Plataforma media	S,C,P
S-4	Mb. Bujaraloz	Plataforma	S,C
S-5	Mb. Bujaraloz	Val	S,C
S-6	Mb. Bujaraloz	Val	P,C
S-7	Mb. Bujaraloz	Plataforma	S,C,p
S-8	Mb. Bujaraloz	Plataforma	S,C,p
S-9	Mb. Bujaraloz	Plataforma	S,C,p
S-10	Mb. Peñalba	Plataforma	S,C,N

S = somero

P = profundo (> 50 cm)

Y = yesos

s = sales

C = carbonatos

p = pedregosidad

N = capa freática

Tabla 20. Prospección geoelectrica Wenner: Características de los puntos de muestreo para la detección de capas freáticas.

POZO	FORMACION GEOLOGICA	POSICION GEOMORFOLOGICA	TIPO DE SUELO
13	Yesos de Retuerta	Val	P,Y
17	Bujaraloz	Plataforma	S,C,p
24	Bujaraloz	Plataforma	S,C,p
43	Bujaraloz	Val	S,s
54	Bujaraloz	Depresión	S,C
118	Bujaraloz	Val	S,C,P

S = somero

P = profundo (> 50 cm)

Y = yesos

s = sales

C = carbonatos

p = pedregosidad

N = capa freática

4.4. RESULTADOS Y DISCUSION

4.4.1. Geología

Revisión cartográfica y descripción de sondeos

El análisis litoestratigráfico realizado por Quirantes ha permitido dividir las facies litológicas presentes en la parte central Aragonesa de la Depresión terciaria del Ebro, en tres grandes grupos: (1) litofacies detríticas, (2) litofacies calcáreas y (3) litofacies evaporíticas.

En el área de estudio se encuentran representados los tres grupos de litofacies citados. Su representación a escala 1:50.000, trasladada mediante pantógrafo de la cartografía de Quirantes (1978) de escala 1:250.000, y revisada en campo se presenta en el Plano 1. En el Plano 2 se presenta la cartografía a escala 1:50.000 realizada con la terminología del mapa geológico nacional.

Cada una de las formaciones definidas por Quirantes se ha subdividido apoyándonos en un análisis detallado de las series estratigráficas. La localización de las series estratigráficas se presenta en la Figura 23 y la descripción de las mismas en la Figura 24. Las características principales de las formaciones (Miembros) son las siguientes:

(1) La Formación Zaragoza, representada por el Miembro Yesos de Retuerta, está presente en el extremo occidental del área de estudio. Quirantes describe esta formación como "un paquete de margas y yesos. Los yesos son alabastrinos en nódulos alternando

en tres tramos: (1) M1-4y, aparece en la parte inferior de la serie 1A y en la parte superior de la serie 1B con características ligeramente diferentes. Su localización coincide con la parte central del Miembro Yesos de Retuerta de la cartografía de Quirantes. Esta constituido por yesos, margas y lutitas. En la bibliografía se cita la existencia de limos yesíferos, aunque ni la descripción realizada ni su localización en las series estratigráficas se haya concretado. En la serie 1A se han descrito unas limolitas, pero su contenido en sulfato y calcio no permiten denominarlas yesíferas; (2) M1-4m: el carácter calcáreo que presentan las series hacia el NE y la ausencia de bancos de yeso de espesores importantes permite englobar el tramo medio de la serie 1A en este término; (3) M1-4c: hacia el SW las calizas y margas son los componentes fundamentales, estando los yesos y limos yesíferos prácticamente ausentes. Los términos superiores de la serie 1B (M1-4y) están constituidos fundamentalmente por margas, calizas, yesos y menor contenido en lutitas que el mismo tramo en una posición inferior en la serie estratigráfica. Los yesos son muy abundantes en esta serie, especialmente a techo.

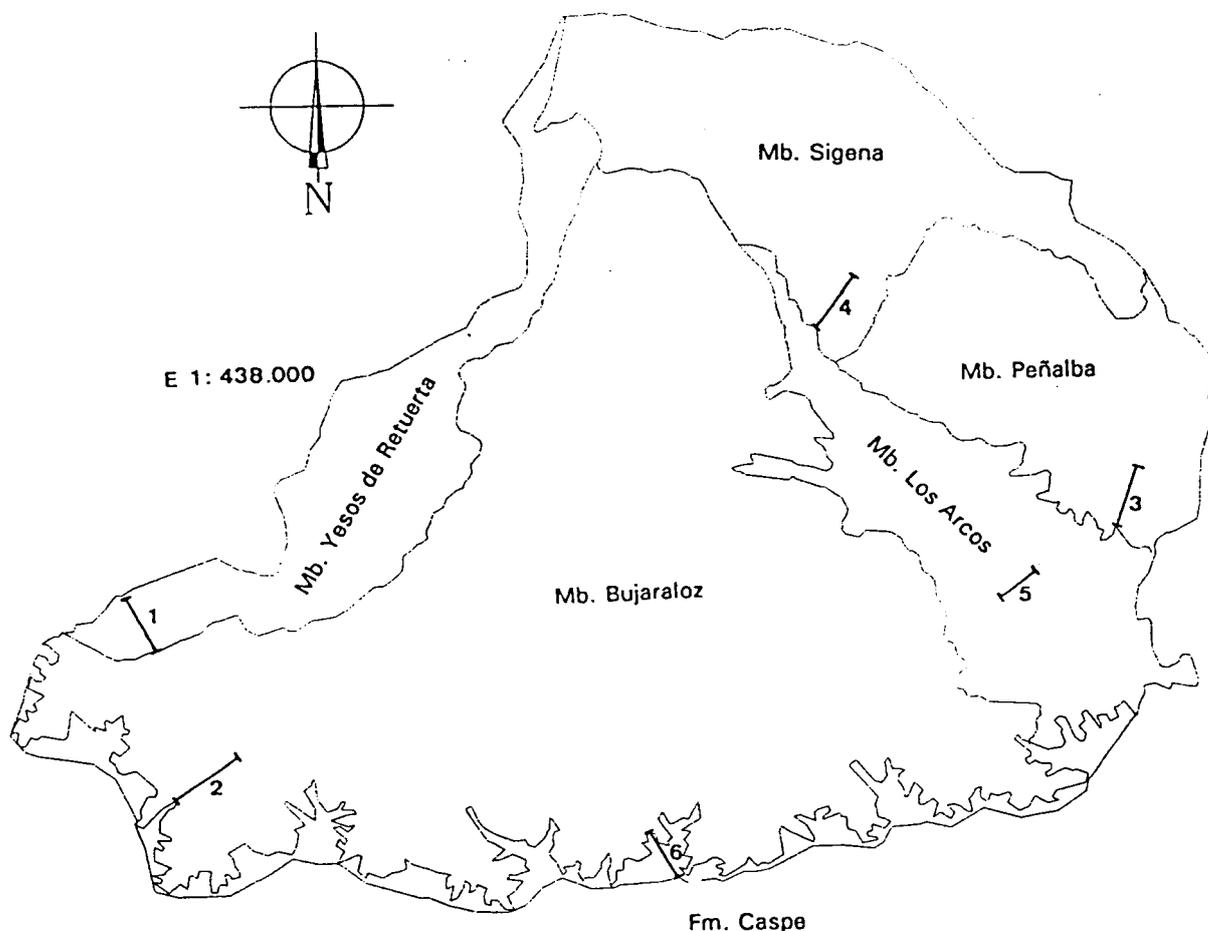
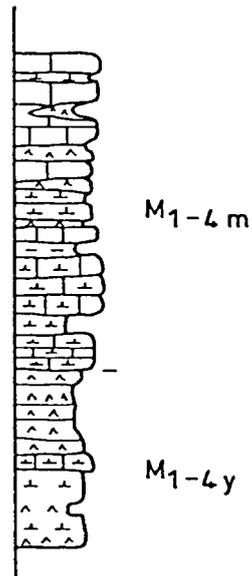
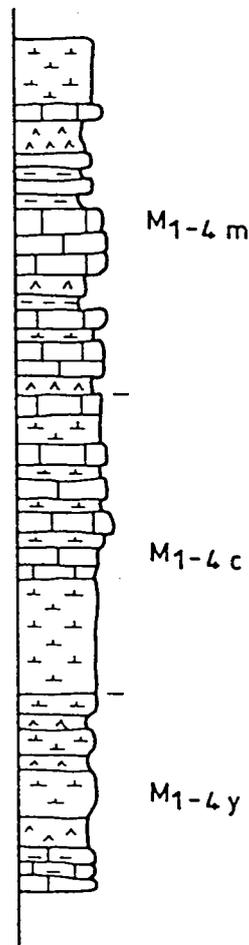


Figura 23. Localización geográfica de las series estratigráficas.

SERIE 1. Mb. Yesos de Retuerta.



SERIE 2. Mb. Bujaraloz.



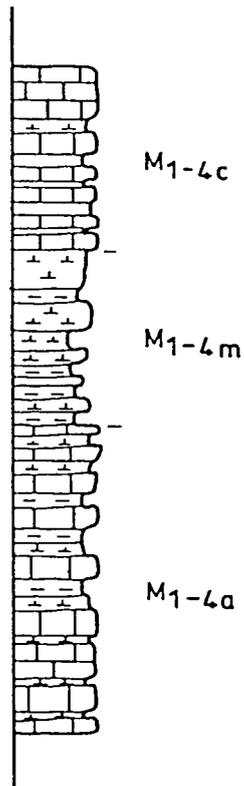
LEYENDA

	Lutitas
	Calizas
	Margas
	Yesos
	Areniscas
	Lignito
	Lutitas con nódulos de yeso

Escala 1:1000

Figura 24.1. Series estratigráficas realizadas en las formaciones geológicas descritas por Quirantes y tramos litológicos en los que se subdivide cada serie estratigráfica en la cartografía a escala 1:50.000.

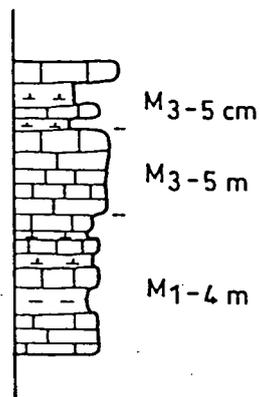
SERIE 3. Mb. Calizas de Peñalba.



LEYENDA

	Lutitas
	Calizas
	Margas
	Yesos
	Areniscas
	Lignito
	Lutitas con nódulos de yeso

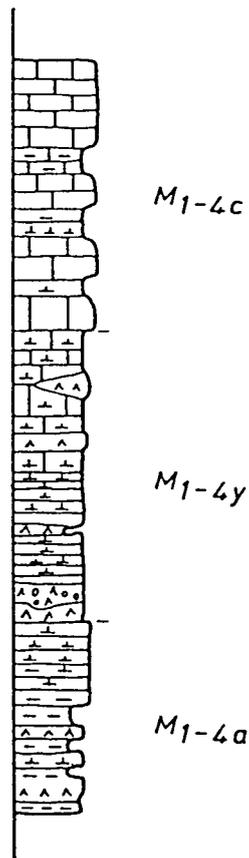
SERIE 4. Mb. Sigena.



Escala 1:1000

Figura 24.2. Series estratigráficas realizadas en las formaciones geológicas descritas por Quirantes y tramos litológicos en los que se subdivide cada serie estratigráfica en la cartografía a escala 1:50.000.

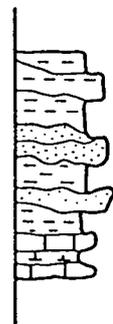
SERIE 5. Mb. Los Arcos.



LEYENDA

	Lutitas
	Calizas
	Margas
	Yesos
	Areniscas
	Lignito
	Lutitas con nódulos de yeso

SERIE 6. Fm. Caspe.



Escala 1:1000

Figura 24.3. Series estratigráficas realizadas en las formaciones geológicas descritas por Quirantes y tramos litológicos en los que se subdivide cada serie estratigráfica en la cartografía a escala 1:50.000.

La serie estratigráfica presentada en la Figura 24.1, que fue realizada en el Barranco Varella La Tranca, sólo presenta los tramos M1-4y y M1-4m.

(2) La Formación Alcubierre está representada por los Miembros Bujaraloz, Calizas de Peñalba y Calizas de Sigena.

El Miembro Bujaraloz ocupa la parte central de la zona de estudio y es, asimismo, la facies más extensa de las presentes. La parte norte está constituida por las Margas de Valfarta, que presentan las siguientes subdivisiones: (1) margas blancas y rojizas alternando con yesos y bancos calcáreos delgados, representada en la cartografía con la notación M1-4m, y que se relaciona lateralmente con (2) un tramo con la notación M1-4a, que corresponde a una facies menos margosa, con frecuentes bancos calcáreos, yesos menos potentes y frecuente presencia de lutitas en la serie.

Las Calizas de Bujaraloz (Quirantes, 1978) ocupan la plataforma calcárea que hay al Sur de Bujaraloz. Este autor subdivide la serie estratigráfica en tres subniveles: (1) el nivel inferior, formado por una alternancia de yesos, margas y algunas calizas; (2) el nivel medio, constituido por calizas con alguna capa de margas y (3) el nivel superior, que es el más potente y está formado por margas y calizas, presentándose yesos y limos como intercalaciones. En la cartografía realizada en este trabajo se han identificado, asimismo, dichos niveles (aunque la aparición y distribución de cada litología a escala 1:50.000 no coincide exactamente con la descripción de Quirantes) y se han denominado M1-4m, M1-4y, y M1-4c, respectivamente (Serie 2). El primero de ellos ocupa la mayor extensión cartografiada en el área de estudio.

El análisis litológico de los sondeos localizados mayoritariamente en esta litofacies sólo permite conocer los primeros 13 m (primera fase de sondeos) y 18 m (segunda fase de sondeos) del tramo superior del Mb. Bujaraloz. Sin embargo, el análisis del sondeo 27, que tiene una profundidad de 120 m, permite establecer que (a) las lutitas están prácticamente ausentes en la serie, (b) el tramo superior está constituido por calizas, yesos y margas, siendo estos dos últimos los más abundantes, mientras que el tramo inferior está constituido casi exclusivamente por calizas y margas y (c) todos los materiales litológicos están representados por estratos muy poco potentes (máximo 0.5 m).

Los sondeos de pequeña profundidad corresponden al tramo superior definido en el sondeo profundo. Sin embargo, es difícil hacer correlaciones entre ellos debido a fenómenos de hundimiento originados por disolución del sustrato infrayacente, muy frecuentes en la zona central del Mb. Bujaraloz, y a las frecuentes variaciones laterales de las litologías (propias del medio sedimentario en que se desarrollaron). Aunque los materiales calcáreos (calizas y margas) presentan una mayor continuidad, ésta es insuficiente para correlacionar los sondeos. En algunos sondeos (sondeo 11 y sondeo 17) han aparecido pequeños estratos de lignitos que podrían constituir niveles guía para dicha correlación (Fichas de sondeos-Anexo 3). Otros aspectos confirmados por los sondeos son la gran fracturación que sufren los materiales, el importante grado de karstificación en calizas y yesos, y el importante desarrollo de neoformación del yeso.

El Miembro Peñalba, que ocupa una pequeña extensión en la parte centro oriental del área de estudio, ha sido subdividido en tres niveles (Serie 3): el nivel inferior (M1-4a), constituido por margas y arenitas yesíferas, el nivel medio (M1-4m) formado por margas, yesos y calizas alternantes y el nivel superior (M1-4c), constituido por margas y lutitas rojas.

El Miembro Calizas de Sigena se extiende al E. de la Sierra de Alcubierre. Su litología (Serie 4) está compuesta por calizas en bancos potentes y con un espesor que oscila entre los 1 y 1.5 m. La cartografía, realizada a escala 1:50.000, permite hacer algunas subdivisiones. Haciendo un corte de sur a norte encontramos (1) M1-4m, constituido por margas, yesos y calizas. A continuación se presenta (2) un tramo alternante de margas y calizas (M 3-5cm) que pasa a (3) una serie eminentemente calcárea, que constituye el tramo M 3-5cm, cuya descripción coincide con la de Quirantes.

(3) La Formación Calizas de Mequinenza está representada en el área de estudio por su miembro superior, denominado Miembro Los Arcos. Se sitúa de manera asimétrica en los márgenes del Barranco de Valcuerna, aguas abajo de Peñalba, y se abre desde este punto, alcanzando su máxima extensión en las proximidades del Pantano de Mequinenza. Litológicamente, las margas predominan sobre las calizas. En la base hay algunas capas de yeso y en el techo las calizas son algo detríticas.

La cartografía realizada, junto con la descripción de la serie estratigráfica (Serie 5) permite subdividir el miembro Los Arcos en varios tramos según su naturaleza litológica: (1) un término inferior constituido por margas y calizas (M1-4c) al que se superpone (2) un tramo constituido por estratos poco potentes y alternantes de lutitas, margas, yesos y caliza (M1-4a). Sobre este tramo, otro (3) más potente que los dos anteriores, constituido fundamentalmente por margas y yesos (M1-4y). La serie finaliza con la repetición de estos dos últimos términos y un término final que puede considerarse una variación del situado a muro (M1-4c), aunque es eminentemente calcáreo.

(4) La Formación Caspe es la única formación de facies detrítica descrita en el área. Como ya se ha dicho, ocupa una posición marginal en el área de estudio. Litológicamente (Serie 6) está formada por areniscas dispuestas en cordones, denominados paleocanales. Quirantes señala que presenta un desarrollo lateral muy variable. Forma una lengua detrítica que se indenta en las Calizas de Sástago y Bujaraloz. Aunque se ha considerado que se trata de una facies miocena, parte de ella, en el área de estudio y a escala 1:200.000, ha sido cartografiada como Oligoceno. La revisión realizada a escala 1:50.000 no permite aclarar esta falta de acuerdo entre las cartografías citadas, pues está fuera de los objetivos de este estudio.

A escala 1:50.000 se han cartografiado, dentro del área ocupada por esta facies litoestratigráfica (Plano 2), numerosas manchas de cuaternario (Pleistoceno-Holoceno). Se trata principalmente de un cuaternario indiferenciado que ocupa los fondos de los barrancos, depresiones y vales del área. En ocasiones, el relleno cuaternario tiene una potencia importante (> 3 m), especialmente en la parte norte del área de estudio, donde los barrancos tienen un mayor desarrollo y una cuenca de recepción importante. Asimismo, se encuentran algunos afloramientos aislados con morfología de glaciis constituidos por cantos calcáreos principalmente y con intercalaciones arenosas. Se han observado a techo costras calcáreas.

Otros depósitos cuaternarios de mayor extensión superficial procedentes de glaciis recientes o de glaciis degradados se presentan en las inmediaciones de Valcuerna. Los cantos son predominantemente calcáreos y están dispersos y sin estructura en una masa lutítica o limolítica.

Constituyen asimismo rellenos cuaternarios los sedimentos salinos que, en ocasiones con potencias de al menos 2 m, ocupan el fondo de depresiones y lagunas

salinas que se encuentran repartidas en el área.

A los depósitos de relleno aluvial y a los sedimentos lagunares se les atribuye una edad holocena y al resto de los materiales cuaternarios, pleistoceno inferior o pleistoceno.

Láminas delgadas

La descripción de los materiales litológicos en los que se han realizado láminas delgadas confirma la homogeneidad aparente entre litologías y formaciones geológicas. La Tabla 21 resume las observaciones efectuadas con el microscopio sobre las láminas delgadas. Los yesos de todas las formaciones geológicas analizadas (Fm. Zaragoza, Fm. Alcubierre, Fm. Mequinenza) presentan cristales de tamaños variados con inclusiones de anhidrita. Las texturas en que se presentan son alabastrinas y sacaroideas microcristalinas principalmente. En el sondeo 4 aparecen los yesos con matriz arcillosa y carbonatada rodeando los cristales subidiomorfos de yeso. Las calizas son mayoritariamente micríticas, con abundante materia orgánica y restos de fauna (ostrácodos y caráceas). Son muy importantes en estos materiales las inclusiones de yeso y los recrecimientos de esparita y microesparita. En algún caso se presentan nódulos de sílex y algunas micas dispersas. La porosidad, que oscila entre el 1% y el 30%, es una característica muy variable, aunque en la mayoría de las muestras es inferior al 5%. Dicha porosidad está producida tanto por disolución como por fracturación.

Tabla 21. Geología: Características petrológicas de los materiales litológicos deducidas mediante observación al microscopio de láminas delgadas.

MUESTRA	MATERIAL	MATRIZ	MINERAL	POROS(%)	MAT.ORG.
M1/9	Caliza	micr	cal,anh,yes	30	no
M2/9	Yeso	micr	yeso	< 5	no
M3/9	Caliza	micr	cal	< 5	fauna
M4/6	Caliza	esp	cal	10-20	fauna
M5/8	Caliza	microesp	cal	5-10	fauna
M6/8	Marga	micr	cal,arc	10	< fauna
M7/8	Caliza	micr	yeso	< 5	< fauna
M8/8	Yeso	micr	yeso	< 5	no
M9/4	Yeso	micr	yes,anh	< 5	no
M10/4	Caliza	micr	cal,yes	< 5	fauna
M11/4	Marga	micr	yes,anh	10-15	fauna
M12/4	Yeso	micr	yeso	5	no

Muestra: El primer número se refiere al número de la muestra y el segundo al número del sondeo

Matriz: micr = micrítica; esp = esparítica; microesp = microesparítica

Mineralogía: anh = anhidrita; yes = yeso; arc = minerales de arcilla; cal = calcita

4.4.2. Salinidad de los materiales litológicos

Ensayo 1: Disolución de los materiales litológicos en agua desionizada.

En la primera parte de este ensayo (Ensayo 1A) se ha determinado la evolución temporal de la CE (Tabla 22 y Figura 25) y pH (Tabla 23 y Figura 26) de las soluciones obtenidas al añadir 0.5 g de cada material litológico a 0.1 L de agua desionizada (esto es, 5 g/L), así como las composiciones iónicas (Tabla 24) obtenidas al final del ensayo (t = 10 semanas).

En la Tabla 22 se observa que las lutitas y margas de las distintas formaciones proporcionan valores de CE sensiblemente diferentes, en tanto que las calizas y yesos tiene valores muy parecidos. En todos los casos (salvo los yesos), la CE de las soluciones disminuye en el orden Zaragoza (Yesos de Retuerta) > Alcubierre (Bujaraloz) > Mequinenza (Los Arcos), observándose las mayores diferencias (para t = 10 semanas) en las lutitas ($CE_1/CE_3 = 2.4$) y margas ($CE_1/CE_2 = 3$).

Aunque el análisis de un solo sondeo no es necesariamente representativo de una formación o miembro, estos resultados indican que las lutitas y margas del miembro Yesos de Retuerta disuelven una mayor cantidad de sólidos que las de los otros dos miembros. De cualquier forma, los valores de CE obtenidos son relativamente bajos, lo que indica que dichos materiales, con excepción del yeso, no son "a priori" una fuente relevante de sales para las aguas subterráneas. Por otro lado, de la Figura 25 se deduce que todas las soluciones alcanzan el equilibrio con las fases sólidas respectivas, aunque los tiempos a los que se estabilizan los valores de CE de los materiales litológicos son muy diferentes (salvo en las calizas): los materiales del miembro Yesos de Retuerta se equilibran en una o dos semanas, en tanto que los de los otros miembros tienen todavía tiempos de equilibrio superiores. Estos tiempos son mayores de los anticipados, ya que incluso para el yeso se precisan semanas, lo que sugiere que la disolución y equilibrado de estos materiales esta cinéticamente limitada o viene afectada por otros procesos, como posibles reacciones de intercambio en las lutitas o cambios en la concentración del CO_2 disuelto, que afectaría a la solubilidad de los materiales carbonatados.

Respecto al pH, puede observarse que todos los valores obtenidos son básicos y que las diferencias entre formaciones son pequeñas. El pH de los yesos y lutitas se estabiliza a partir de unas cuatro semanas, en tanto que el de las calizas y margas tiende a descender con el tiempo, debido a que el ensayo se realizó en sistema abierto. Esto es, la presión parcial del CO_2 atmosférico puede considerarse constante, lo que permite que el gas se disuelva de forma progresiva en la solución conforme procede la disolución del carbonato cálcico. De cualquier forma, todos los valores finales de pH (t = 10 semanas) son inferiores a 8.3, lo que indica que el bicarbonato es la especie iónica de Carbono inorgánico mayoritaria en estas soluciones.

Lógicamente, estos resultados no son extrapolables a las condiciones imperantes en el campo, donde probablemente la presión parcial del CO_2 es inferior a la atmosférica y donde el sistema puede considerarse cerrado en el caso de que los materiales litológicos se encuentren por debajo del nivel freático. En esas circunstancias, es lógico esperar que el pH sea superior al deducido en el sistema abierto a la atmósfera (Garrels and Christ, 1964). El hecho de que el pH de los yesos sea ligeramente alcalino puede responder a la presencia de la matriz carbonatada (micrítica y esparítica) observada en las respectivas láminas delgadas ($M_{2/9}$, $M_{8/8}$ y $M_{12/4}$).

Tabla 22. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 1A: Evolución temporal de la CE (dS/m) de las soluciones de los distintos materiales (5 g material/L agua desionizada).

FORMACION GEOLOGICA (Miembro)	MATERIAL LITOLOGICO*	TIEMPO (semanas)												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
Y. Retuerta	Lutita 1	0.10	0.33	0.40	0.38	0.38	0.38	0.41	0.41	0.41	0.41	0.42	0.43	0.43
	Lutita 2	0.10	0.21	0.27	0.30	0.31	0.32	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
	Lutita 3	0.15	0.12	0.13	0.14	0.14	0.14	0.16	0.16	0.16	0.16	0.17	0.18	0.18
Y. Retuerta	Caliza 1	0.08	0.13	0.17	0.19	0.20	0.20	0.21	0.21	0.22	0.22	0.23	0.24	0.25
	Caliza 2	0.08	0.12	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.20	0.20	0.21	0.21	0.21	0.21
	Caliza 3	0.06	0.14	0.16	0.17	0.18	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.19	0.19
Y. Retuerta	Marga 1	0.24	0.48	0.52	0.53	0.51	0.50	0.53	0.53	0.53	0.53	0.54	0.54	0.54
	Marga 2	0.06	0.12	0.14	0.16	0.16	0.16	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18
	Yeso 1	0.88	2.07	2.14	2.17	2.17	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25
Bujaraloz	Yeso 2	1.15	1.46	1.82	2.07	2.01	2.26	2.26	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27	2.27
	Yeso 3	1.41	1.65	1.72	1.83	1.85	1.97	2.06	2.08	2.08	2.17	2.17	2.17	2.17

* 1, 2 y 3 se refieren a las formaciones de Zaragoza, Alcubierre y Mequinenza, respectivamente

Tabla 23. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 1A: Evolución temporal del pH de las soluciones de los distintos materiales litológicos (5 g material/L agua desionizada).

FORMACION GEOLOGICA (Miembro)	MATERIAL LITOLOGICO*	TIEMPO (semanas)									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Y. Retuerta	Lutita 1	8.76	8.81	8.42	8.32	8.12	8.16	8.14	8.19	8.01	8.16
Bujaraloz	Lutita 2	8.70	8.79	8.40	8.28	8.26	8.18	8.17	8.16	8.14	8.13
Los Arcos	Lutita 3	8.19	8.25	8.26	7.93	7.96	7.87	7.98	8.08	8.19	8.08
Y. Retuerta	Caliza 1	9.40	9.38	9.16	9.01	8.53	8.50	8.48	8.42	8.28	8.21
Bujaraloz	Caliza 2	9.07	9.02	8.98	8.55	8.65	8.57	8.29	8.25	8.26	8.24
Los Arcos	Caliza 3	9.10	9.08	9.12	9.00	8.55	8.60	8.59	8.30	8.27	8.24
Y. Retuerta	Marga 1	8.49	8.12	8.07	8.17	7.95	8.01	7.99	8.05	8.03	7.88
Bujaraloz	Marga 2	9.02	8.83	8.75	8.68	8.45	8.45	8.34	8.34	8.26	8.16
Y. Retuerta	Yeso 1	7.29	7.28	7.35	7.38	7.20	7.15	7.23	7.23	7.23	7.24
Bujaraloz	Yeso 2	7.61	7.57	7.52	7.52	7.56	7.73	7.78	7.60	7.55	7.69
Los Arcos	Yeso 3	7.49	7.46	7.50	7.57	7.59	7.53	7.46	7.69	7.46	7.41

* 1, 2 y 3 se refieren a las formaciones de Zaragoza, Alcubierre y Mequinenza, respectivamente.

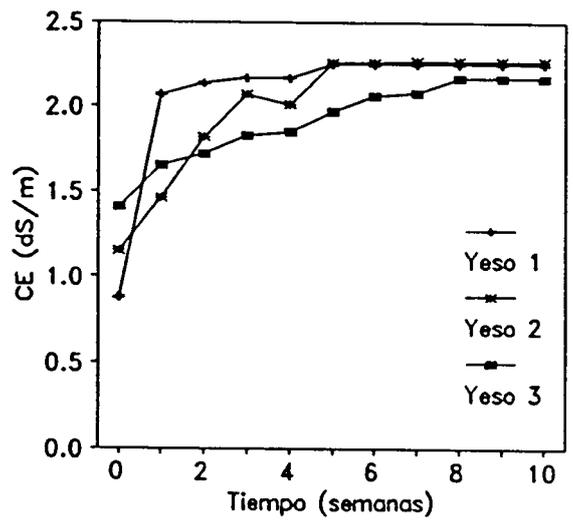
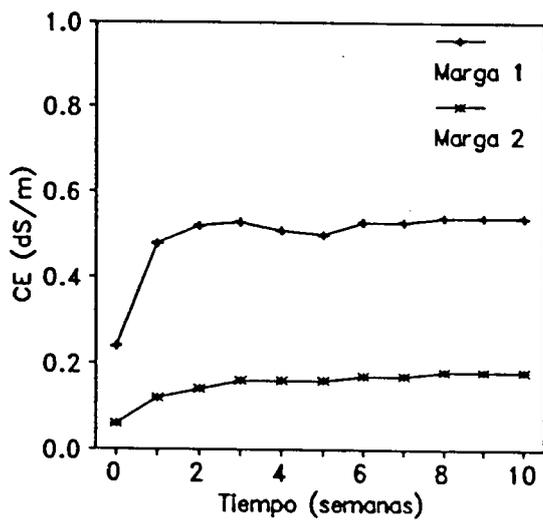
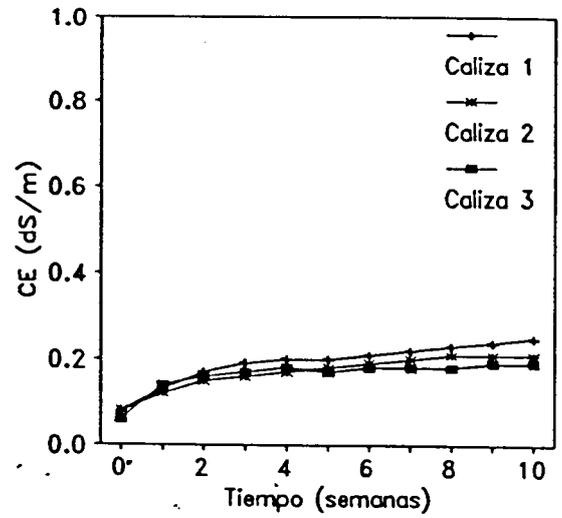
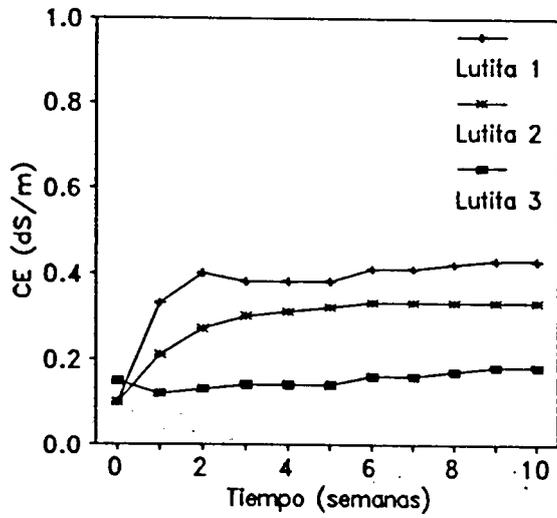


Figura 25. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 1A: Evolución temporal de la CE(dS/m) de las soluciones (5 g material litológico/L de agua desionizada).

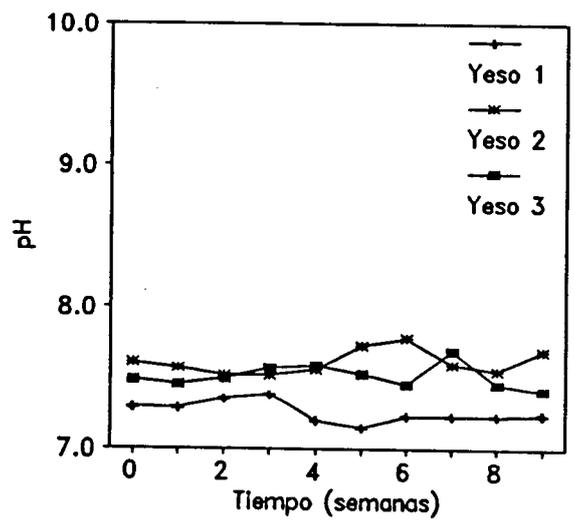
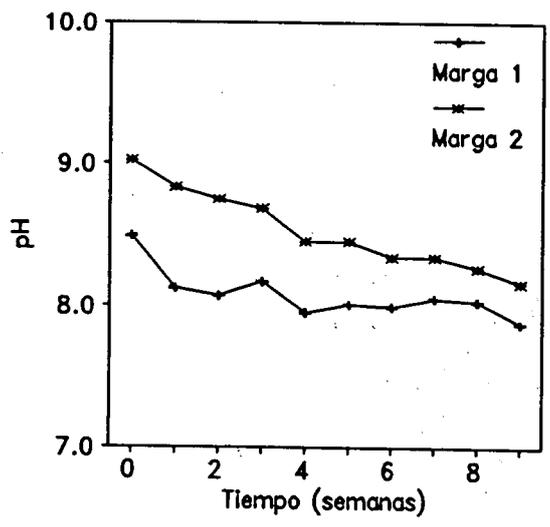
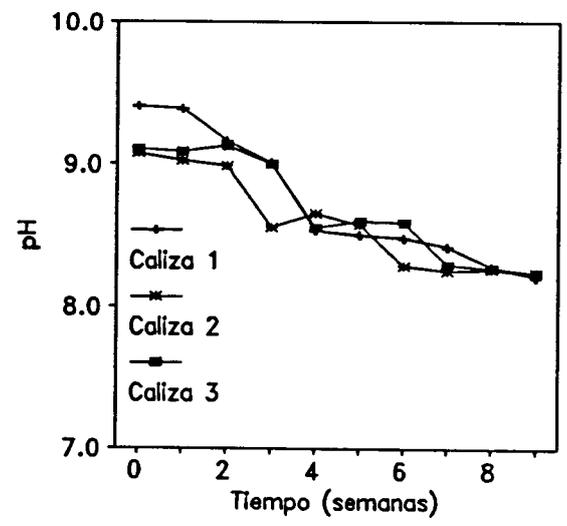
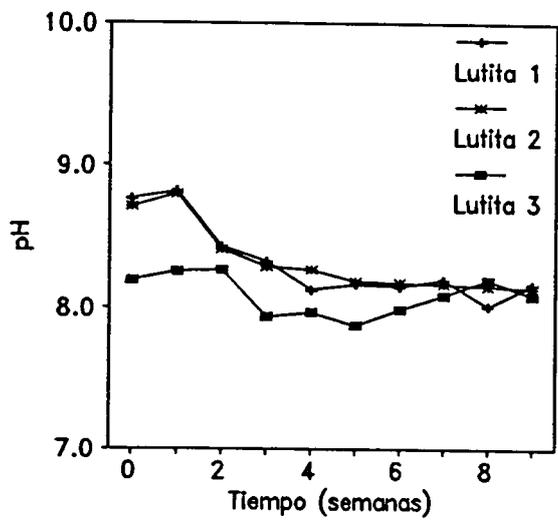


Figura 26. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 1A: Evolución temporal del pH de las soluciones (5 g material litológico/L de agua desionizada).

Finalmente, respecto a las composiciones iónicas obtenidas al final del ensayo, la Tabla 24 indica que los iones calcio y sulfato son mayoritarios en todos los materiales litológicos, lo que coincide con los resultados de Pinilla (1966). Sin embargo, el segundo catión en importancia en la Tabla 24 es el magnesio mientras que, según Pinilla (1966), las margas y yesos de la serie Este presentan mayor contenido de sodio que de magnesio. El resto de los iones analizados presentan contenidos concordantes con los obtenidos por Pinilla (1966) y Quirantes (1978), aunque la primera sólo presenta resultados medios del conjunto de muestras de cada serie.

Las relaciones iónicas Ca/Na y Ca/Mg son en todos los casos mayores de 2, indicando el hecho ya comentado de la preponderancia del ion calcio. Ello hace que la relación de adsorción de sodio (RAS) de estas soluciones sea muy baja, lo cual es beneficioso desde el punto de vista de la estabilidad estructural de los medios porosos. El valor más bajo de Ca/Na se obtiene en general en las lutitas, lo que sugiere que puede existir una cierta proporción de Na en sus posiciones de cambio. Por otro lado, se observa que las relaciones Cl/Na y SO_4/Ca tienen valores próximos a la unidad (entre 0.5 y 2), lo que sugiere que la fuente de estos iones es fundamentalmente halita y anhidrita/yeso o minerales similares con las proporciones estequiométricas adecuadas. Finalmente, deben resaltarse las composiciones iónicas claramente diferentes de las dos margas, lo que hace que las relaciones Ca/Na y Ca/Mg sean unas cinco veces mayores en la Marga 1 que en la Marga 2.

Los resultados obtenidos con el modelo WATEQ (Tabla 25) indican que las especies iónicas libres son las más importantes, alcanzando porcentajes de entre el 80 al 100% de la concentración molal total. Únicamente en el yeso es importante la formación del par iónico $CaSO_4^0$, que alcanza concentraciones en torno a 5.2 mol/L frente a 10 mol/L del calcio y sulfato libres (se asume que a estas concentraciones molalidad y molaridad son equivalentes). Esto es, en torno al 65% de la concentración total del calcio y sulfato están en forma libre y el 35% en forma de par iónico neutro.

En la Tabla 25 se presentan asimismo los índices de saturación ($IS = \text{Log} (PAI/Kt)$) estimados por WATEQ. Únicamente se presentan los minerales con IS iguales o mayores de -1.0. Los IS obtenidos indican que los tres yesos están saturados en anhidrita y yeso. Es interesante resaltar que dicha anhidrita ha sido asimismo detectada en el análisis de láminas delgadas. Estos resultados están de acuerdo con los valores obtenidos de CE en torno a 2.2 dS/m (Tabla 24), que corresponden a los de una solución saturada en yeso. Por el contrario, las tres calizas, la lutita 3 y la marga 2 no han alcanzado saturación en aragonito y calcita, aunque en las calizas 1 y 2 los IS de estos dos minerales están muy próximos a saturación. Finalmente, las lutitas 1 y 2 y la marga 1 están saturadas o incluso sobresaturadas en aragonito, calcita y, en dos casos, dolomita.

Respecto a los minerales que proporcionan los iones Na y Cl, no aparecen en la Tabla por tener índices de saturación inferiores a -1.0. El primero que aparece en la salida de WATEQ es la Nahcolita ($NaHCO_3$) con un valor de IS en torno a -7, seguido de la halita con un valor de IS en torno a -10. En los yesos sólo aparece la halita como posible fuente de Na y Cl.

En definitiva, los resultados coinciden en general con las descripciones efectuadas en lámina delgada, aunque debería esperarse saturación en $CaCO_3$ en el caso de calizas y margas, a pesar de que en este caso la presión parcial de CO_2 ha podido jugar un papel al respecto (las soluciones permanecieron tapadas entre las medidas semanales para evitar su evapoconcentración).

En la segunda parte del ensayo 1 (ensayo 1B) se adicionaron pesos crecientes de cada material litológico a 100 mL de agua desionizada, al objeto de determinar la evolución de la CE (Tabla 26 y Figura 27) y estimar a partir de ella el grado cualitativo de saturación y pureza de cada material.

Puede observarse que, excepto en la caliza 1, los valores de CE obtenidos con 4.5 g/L son similares o algo inferiores a los valores obtenidos con 5 g/L en el ensayo 1A (Tabla 22), lo que indica la reproducibilidad de la metodología seguida.

Los tres yesos estabilizan su CE a 2.31 dS/m (valor ligeramente superior a su valor de saturación de 2.2 dS/m) para un peso añadido en torno a los 25 g/L. Dado que la saturación del yeso puro se produce para los 2.6 g/L, ello indica que en torno a un 10% del material litológico es yeso y el resto son minerales de menor solubilidad. Estos resultados confirman que el yeso litológico analizado, de carácter alabastrino, no contiene impurezas más solubles que este mineral, aunque otros tipos de yesos frecuentes en la zona (Quirantes, 1978) y no muestreados en las columnas litológicas pueden contener sales más solubles, tal como indica Pinilla (1966) en relación con las halitas, las cuales constituirían una fuente importante de sodio para las aguas subterráneas.

Algo parecido puede decirse de la ausencia de anhidrita en yesos alabastrinos, citada por Quirantes (1978), cuando en nuestro caso ha aparecido de manera generalizada en las láminas delgadas y existe como mineral en los yesos muestreados según el modelo WATEQ.

Las margas aumentan sustancialmente la CE con el peso añadido, hasta estabilizarse para unos pesos añadidos de entre 200 y 400 g/L (Figura 27). Ello es probablemente debido, tal como propone WATEQ (Tabla 9), a la presencia de magnesita ($pK_{sp} = 7.5$), más soluble que la calcita ($pK_{sp} = 8.35$) y el aragonito ($pK_{sp} = 8.22$), junto con la capacidad de intercambio que proporciona la fracción arcilla de las mismas.

Finalmente, las lutitas 1 y 2 son las que aumentan relativamente más la CE con la adición de material (Figura 27). Ello parece lógico, ya que al aumentar el peso de lutita aumenta la cantidad de ion sodio susceptible de desorberse de las posiciones de cambio. Ello, a su vez, aumenta la solubilidad de los minerales con iones no comunes, lo que incrementa la desorción de sodio para reequilibrar la fase sólida con la solución, y así sucesivamente. El menor incremento que sufre la lutita 3 puede explicarse por la menor proporción de minerales cálcicos (aragonito, calcita y dolomita) y magnésicos (dolomita y magnesita) (Tabla 25), lo que ralentiza la reacción en cadena mencionada anteriormente.

En resumen, los resultados obtenidos en los ensayos 1A y 1B sugieren que la fuente principal de sodio proviene de las posiciones de cambio de las lutitas, en tanto que las fuentes principales de magnesio serían la dolomita y, en menor proporción, la magnesita presentes en las lutitas y margas (Tabla 9). De cualquier forma, el sodio presente en estos materiales litológicos es despreciable, salvo en el caso de la lutita del Miembro Yesos de Retuerta (Tabla 24), lo que hace que este material sea el que más ha aumentado la CE en el ensayo 1B.

equilibrio (t = 10 semanas) de los distintos materiales.

MATERIAL	Ca	Mg	Na	SO ₄	Cl	HCO ⁺ ₃	Ca/Na	Ca/Mg	RAS	Cl/SO ₄	Cl/Na	SO ₄ /Ca	CE		pH
	meq L ⁻¹												dS/m		
Lutita 1	3.71 (35.20)	0.99 (9.40)	0.57 (5.40)	3.20 (30.30)	1.33 (12.60)	0.74 (8.00)	6.51	3.74	0.37	0.41	2.33	0.86	0.43	8.16	
Lutita 2	2.36 (37.22)	0.69 (10.90)	0.12 (1.90)	1.18 (18.61)	0.09 (1.40)	1.90 (30.00)	19.66	3.42	0.10	0.08	0.75	0.5	0.33	8.13	
Lutita 3	1.80 (37.20)	0.54 (11.20)	0.08 (1.65)	2.16 (44.60)	0.08 (1.65)	0.18 (20.60)	22.50	3.33	0.07	0.03	1.00	1.20	0.18	8.08	
Caliza 1	2.38 (45.25)	0.20 (3.80)	0.05 (0.95)	2.02 (38.40)	0.10 (1.90)	0.51 (9.70)	47.60	11.99	0.04	0.05	2.00	0.85	0.25	8.21	
Caliza 2	2.08 (45.41)	0.16 (3.50)	0.05 (1.10)	1.82 (39.70)	0.06 (1.31)	0.41 (8.95)	41.60	13.00	0.05	0.03	1.20	0.87	0.21	8.24	
Caliza 3	1.45 (44.48)	0.13 (3.98)	0.05 (1.54)	1.35 (41.40)	0.06 (1.80)	0.22 (6.70)	29.00	11.15	0.06	0.04	1.20	0.93	0.19	8.24	
Marga 1	5.61 (45.16)	0.53 (4.30)	0.07 (0.60)	2.65 (21.30)	0.10 (0.80)	3.46 (27.84)	80.14	10.60	0.04	0.04	1.43	0.50	0.54	7.88	
Marga 2	1.61 (32.60)	0.75 (15.20)	0.11 (2.20)	1.90 (38.50)	0.06 (1.20)	0.51 (10.30)	14.63	2.14	0.10	0.03	0.54	1.20	0.18	8.16	
Yeso 1	30.60 (48.40)	0.15 (0.24)	0.04 (0.06)	32.40 (51.20)	0.05 (0.02)	-	765	204	0.01	0.00	1.25	1.05	2.25	7.24	
Yeso 2	30.25 (48.20)	0.18 (0.28)	0.05 (0.08)	32.20 (51.30)	0.07 (0.14)	-	605	168	0.01	0.00	1.40	1.06	2.27	7.69	
Yeso 3	30.01 (48.25)	0.11 (0.18)	0.03 (0.05)	32.00 (51.44)	0.05 (0.08)	-	1000	273	0.00	0.00	1.66	1.06	2.17	7.41	

* Estimado por diferencia de $\Sigma_{\text{cat}} - \Sigma_{\text{an}}$
En paréntesis: iones en % de $\Sigma_{\text{cat+an}}$

Tabla 25. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 1: Parámetros estimados por el modelo WQ4F en base al análisis iónico de las soluciones (5 g material/L agua desionizada) de equilibrio (t = 10 semanas) de los distintos materiales litológicos.

	Lut1	Lut2	Lut3	Cal1	Cal2	Cal3	Mar1	Mar2	Yes1	Yes2	Yes3
TDS (ppm)	346	234	162	183	159	112	462	168	2174	2159	2142
I (mMol/L)[†]	8.1	4.9	4.2	4.4	3.9	2.9	9.3	4.2	41.9	41.7	41.4
Ca⁺² (mMol/L)	1.63	1.08	0.81	1.07	0.94	0.67	2.46	0.73	10.0	9.9	9.8
CaSO₄[*] (mMol/L)	0.21	0.06	0.09	0.11	0.09	0.05	0.24	0.07	5.3	5.2	5.2
Mg⁺² (mMol/L)	0.44	0.32	0.25	0.09	0.07	0.06	0.24	0.34	0.05	0.06	0.04
MgSO₄[*] (mMol/L)	0.05	0.02	0.02	-	-	-	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02
Na⁺ (mMol/L)	0.57	0.12	0.08	0.05	0.05	0.05	0.07	0.11	0.04	0.05	0.03
HCO₃⁻ (mMol/L)	0.69	1.81	0.17	0.48	0.39	0.21	3.30	0.49	-	-	-
SO₄⁻ (mMol/L)	1.34	0.51	0.96	0.89	0.81	0.62	1.06	0.85	10.9	10.9	10.8
Cl⁻ (mMol/L)	1.33	0.09	0.08	0.10	0.06	0.06	0.10	0.06	0.04	0.07	0.05
	Log (PAI/Kt)										
Anhidrita	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.05	0.05
Aragonito	0.02	0.27	-0.9	-0.2	-0.3	-0.7	0.59	-0.4	-	-	-
Calcita	0.17	0.42	-0.8	-0.1	-0.2	-0.6	0.73	-0.3	-	-	-
Dolomita	-0.2	0.35	-	-	-	-	0.49	-0.9	-	-	-
Magnesita	-0.9	-0.6	-	-	-	-	-0.7	-1.0	-	-	-
Yeso	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	0.01	0.01

[†]I: Fuerza iónica efectiva

Tabla 26. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 1B: valores de CE (dS/m) de las soluciones obtenidas por incrementos sucesivos del peso de cada material en 1 L de agua desionizada.

MATERIAL	PESO ACUMULADO (g/L)																		
	1.5	2.5	3.5	4.5	7.5	11	15	25	35	45	55	65	75	100	200	300	400	500	
Yeso 1	0.81	1.27	1.50	1.88	2.20	2.26	2.30	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
Lutita 1	0.25	0.34	0.38	0.42	0.65	0.87	1.34	2.31	2.43	2.49	2.54	2.59	2.63	2.81	3.50	3.92	4.30	4.60	4.60
Marga 1	0.31	0.33	0.36	0.37	0.39	0.47	0.58	0.76	0.95	1.25	1.92	2.45	2.73	3.10	3.20	3.23	3.25	3.28	3.28
Caliza 1	0.20	0.21	0.22	0.23	0.27	0.29	0.30	0.33	0.35	0.40	0.50	0.56	0.63	0.77	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
Yeso 2	1.33	1.73	1.98	2.20	2.26	2.28	2.29	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
Lutita 2	0.21	0.25	0.28	0.31	0.33	0.37	0.43	0.66	0.93	1.15	1.54	1.87	2.22	2.75	3.24	3.67	3.84	4.20	4.20
Marga 2	0.08	0.12	0.16	0.18	0.25	0.39	0.49	0.68	0.84	1.15	1.25	1.36	1.56	1.74	2.04	2.15	2.38	2.38	2.38
Caliza 2	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.13	0.16	0.20	0.22	0.24	0.28	0.43	0.57	-	-	-	-	-	-
Yeso 3	0.92	1.35	1.53	1.82	2.21	2.26	2.27	2.28	2.30	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31	2.31
Lutita 3	0.13	0.15	0.16	0.18	0.21	0.23	0.25	0.28	0.31	0.36	0.4	0.44	0.49	0.55	0.63	0.70	0.78	0.81	0.81
Caliza 3	0.03	0.06	0.08	0.14	0.16	0.18	0.19	0.20	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21	0.21

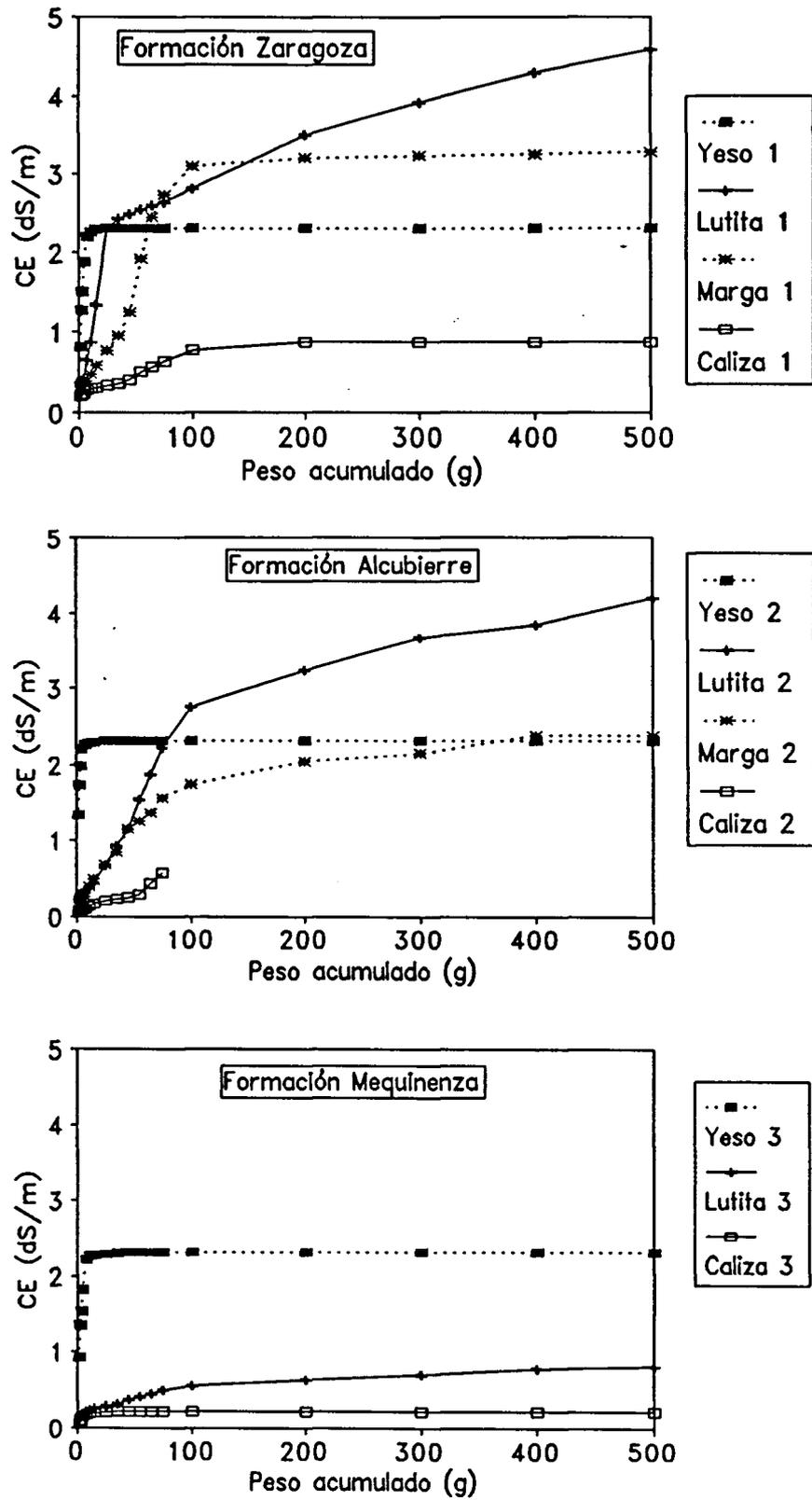


Figura 27. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 1B: Valores de CE (dS/m) obtenidos por incrementos sucesivos del peso de cada material en 1 L de agua desionizada.

Ensayo 2: Efecto del tamaño de grano sobre la tasa de disolución de los materiales litológicos en agua desionizada.

En este ensayo se han utilizado cuatro tamaños de grano diferentes de cada material litológico (mezcla a partes iguales de cada formación) en una proporción de 0.5 g/L agua desionizada.

Los valores de CE de las disoluciones de cada material y tamaño de grano figuran en la Tabla 27. La representación gráfica de dichos valores se presenta en la Figura 28.

Un primer resultado generalizable en estas figuras es que la tasa de disolución, expresada por la pendiente de las curvas, aumenta conforme menor es el tamaño de grano. Un segundo resultado es que los valores finales de CE a $t = 60$ min. son, en general, mayores para los menores tamaños de grano.

En las lutitas la relación inversa entre la CE y el tamaño de grano (Figura 28) se manifiesta en el inicio del ensayo, aunque conforme progresa el tiempo las diferencias son menores y, para $t = 60$ min., los valores son muy similares excepto para el tamaño mayor de grano, donde la CE es un 20% menor que en los otros casos.

En las calizas los valores de CE son relativamente parecidos, excepto para el menor tamaño de grano, que duplica desde el principio la CE del resto de soluciones. En las margas la relación inversa de la CE con el tamaño de grano es muy clara y se mantiene durante todo el ensayo. Los valores de CE son sensiblemente superiores a los de la Tabla 24, probablemente debido a la agitación continua practicada en este ensayo, que ha podido disolver más CO_2 atmosférico, incrementando así la solubilidad de la calcita y aragonito presentes en este material (Tabla 25).

Finalmente, los yesos muestran una diferencia clara en la tasa de disolución inicial y en los valores de CE entre los tamaños de grano menores y mayores de 0.5 mm. Así, para la primera medida efectuada a $t = 5$ min. el tamaño de grano inferior ya ha llegado a su disolución total y la CE permanece constante con el tiempo. El tamaño de grano siguiente (0.5-0.25 mm.) ha alcanzado ya el 70% de la CE final a $t = 5$ min. y el 94% a $t = 30$ min. Por el contrario, para los tamaños de grano mayores la disolución es mucho más lenta. Estas diferencias se van acortando conforme progresa el ensayo y son inferiores al 20% para el final del mismo ($t = 60$ min). Estos resultados son similares a los presentados por Shainberg et al. (1989) e indican la fuerte dependencia de la tasa de disolución del yeso respecto al tamaño de sus partículas.

Los resultados anteriores indican que la granulometría tiene importancia como control de la liberación de sólidos solubles cuando la velocidad del flujo es alta (esto es, tiempos de contacto muy pequeños) mientras que, si el flujo es lento, no existen diferencias sustanciales. Estos resultados no pueden hacerse extensivos a la percolación profunda, pues en el ensayo no se ha simulado el flujo subterráneo.

Tabla 27. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 2: Evolución temporal (minutos) de la CE (dS/m) de las soluciones preparadas con 0.5 g material/L agua desionizada y cuatro tamaños de grano diferentes*.

Tiempo (min)	CE (dS/m)															
	LUTITA				CALIZA				MARGA				YESO			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
5	0.25	0.34	0.39	0.45	0.08	0.05	0.08	0.20	0.14	0.16	0.39	0.48	0.13	0.13	0.36	0.48
10	0.31	0.41	0.42	0.48	0.10	0.07	0.10	0.21	0.16	0.19	0.46	0.58	0.19	0.16	0.39	0.48
15	0.34	0.45	0.45	0.50	0.10	0.08	0.12	0.22	0.19	0.26	0.52	0.62	0.25	0.23	0.44	0.48
20	0.37	0.50	0.48	0.52	0.10	0.08	0.12	0.22	0.20	0.31	0.58	0.64	0.29	0.28	0.46	0.48
25	0.39	0.53	0.49	0.53	0.10	0.08	0.13	0.22	0.22	0.37	0.61	0.66	0.32	0.31	0.46	0.48
30	0.41	0.54	0.51	0.54	0.12	0.09	0.13	0.22	0.25	0.41	0.62	0.67	0.37	0.33	0.47	0.51
35	0.43	0.56	0.52	0.55	0.13	0.09	0.13	0.22	0.29	0.44	0.64	0.70	0.41	0.38	0.50	0.52
40	0.46	0.58	0.54	0.56	0.13	0.10	0.13	0.22	0.32	0.47	0.66	0.73	0.42	0.39	0.51	0.51
45	0.47	0.59	0.56	0.57	0.13	0.10	0.13	0.22	0.34	0.49	0.67	0.75	0.42	0.40	0.50	0.52
50	0.48	0.60	0.58	0.58	0.13	0.10	0.13	0.22	0.36	0.50	0.69	0.76	0.44	0.41	0.50	0.51
55	0.50	0.61	0.59	0.59	0.14	0.10	0.13	0.22	0.37	0.51	0.71	0.78	0.46	0.41	0.50	0.51
60	0.51	0.62	0.59	0.59	0.14	0.10	0.13	0.22	0.39	0.53	0.72	0.80	0.47	0.42	0.50	0.51

* Tamaños de grano: 1: 2.00-1.00 mm, 2: 1.00-0.50 mm, 3: 0.50-0.25 mm, 4: 0.25-0.10 mm.

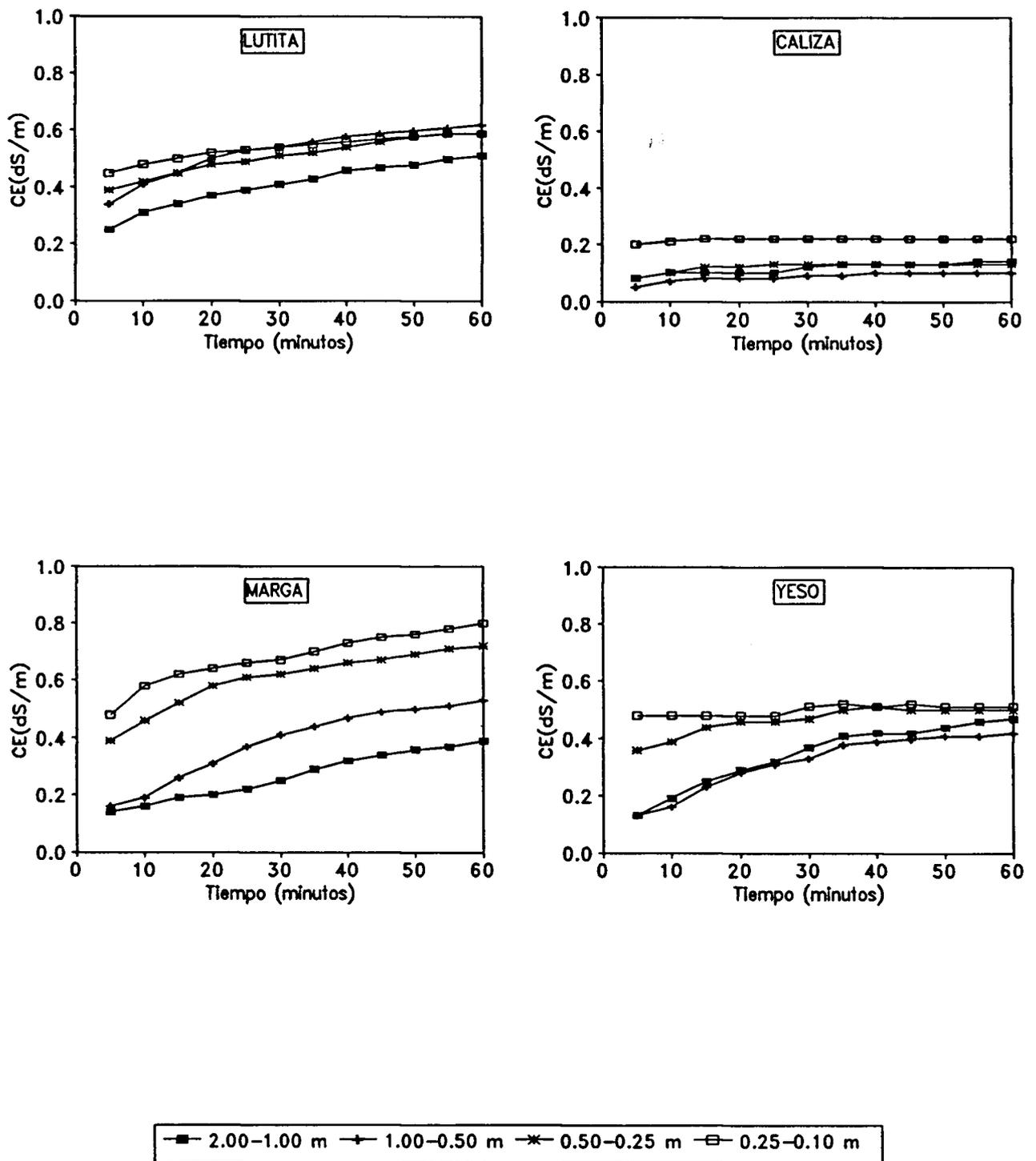


Figura 28. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 2: Evolución temporal de la CE(dS/m) para cuatro tamaños de grano del material litológico en soluciones con 0.5 g de material/L de agua desionizada.

Ensayo 3: Efecto de la composición química del disolvente sobre la disolución de los materiales litológicos.

Las Figuras 29 a 38 presentan la evolución de la CE y pH de los distintos materiales litológicos equilibrados con agua desionizada (AD), agua del canal de Monegros (AM) y soluciones de NaCl (SS, CE = 5.8 dS/m), yeso (SY, CE = 2.2 dS/m) y calcita (SC, CE = 0.22 dS/m).

Los resultados obtenidos en agua destilada son en general concordantes con los deducidos en los ensayos anteriores. Los valores de CE tienden a aumentar ligeramente y los valores de pH tienden a disminuir ligeramente con el tiempo. El yeso es el material que más tarda en equilibrarse con AD, AM y SS. Todos los valores de pH son superiores a 7.0, tal como corresponde a unos materiales donde la presencia de calcita está generalizada.

Las Tablas 28 a 37 presentan la composición iónica de los materiales equilibrados ($t = 6$ días) con las distintas soluciones, así como los resultados obtenidos con el modelo WATEQ. En las leyendas de estas Tablas aparece asimismo el total de sólidos disueltos (TDS) estimado por WATEQ para cada disolvente. En todos los casos se ha optado por estimar el bicarbonato por diferencia de cationes menos aniones, debido a la incertidumbre en el valor analítico de este anión cuando su cuantificación se efectúa en un sistema abierto.

Los resultados obtenidos en agua destilada son coherentes con los deducidos en los ensayos 1 y 2: el calcio es el catión mayoritario en todos los casos, la presencia de sodio y cloruro es muy escasa en todos los casos y el sulfato es el anión mayoritario en la mayor parte de los materiales litológicos analizados. Los valores de Ca obtenidos en las calizas sugieren que existe una fuente adicional a la calcita, tal como el aragonito (Tabla 29), ya que la calcita pura proporciona únicamente una concentración de calcio de 0.8 meq/L cuando se equilibra con agua desionizada a la presión parcial atmosférica del CO_2 de $10^{-3.5}$. Una segunda explicación es que dicha presión parcial sea algo superior a la propuesta, tal como sugieren los valores de pH inferiores a 8.4 (valor de equilibrio de una solución saturada de calcita en equilibrio con dicha presión parcial). En ese caso, las concentraciones de Ca serían similares a las de la Tabla 28.

Tal como se discutió en la introducción de este capítulo, el objetivo fundamental de este ensayo es estimar los sólidos disueltos que aportan los distintos materiales litológicos cuando se equilibran con (1) soluciones saturadas en calcita y yeso (situación real generalizable en el área de estudio), (2) agua del canal de Monegros (futura fuente de agua común a todo el polígono de riego) y (3) una solución de NaCl de CE = 5.83 dS/m, como un caso de fuente de agua salina con iones no comunes a los disueltos por los materiales litológicos en agua destilada. Esta estimación se ha efectuado a partir de los valores de TDS calculados por WATEQ para cada material litológico, a los que se ha sustraído el TDS correspondiente de cada disolvente. Los resultados de TDS aportados por cada material litológico en cada una de las soluciones (Solución Calcita, Agua Monegros, Solución Yeso y Solución Salina) se presentan en la Tabla 38. A efectos de síntesis, se presentan únicamente los valores medios de las dos margas y las tres lutitas, calizas y yesos, puesto que los resultados obtenidos son en general similares para cada material litológico.

De la Tabla 38 se deduce que los sólidos disueltos por los materiales litológicos en la solución de calcita (SC) y en el agua del canal de Monegros (AM) han disminuido en todos los casos respecto a los disueltos en el agua desionizada. El efecto de ion común

es el responsable de este hecho, tal como indica el descenso generalizado en las concentraciones de calcio y/o bicarbonato. Dicho efecto se produce al aumentar la actividad de un ion común al presente en los materiales litológicos, que induce el descenso en la actividad del ion acompañante con el resultado último de una reducción en la solubilidad del mineral correspondiente (en este caso, calcita y/o aragonito). El efecto salino, opuesto al de ion común, es aquí irrelevante, dados los bajos valores de fuerza iónica efectiva (I) de estos dos disolventes ($I = 2.9$ y 4.3 mM/L para SC y AM, respectivamente).

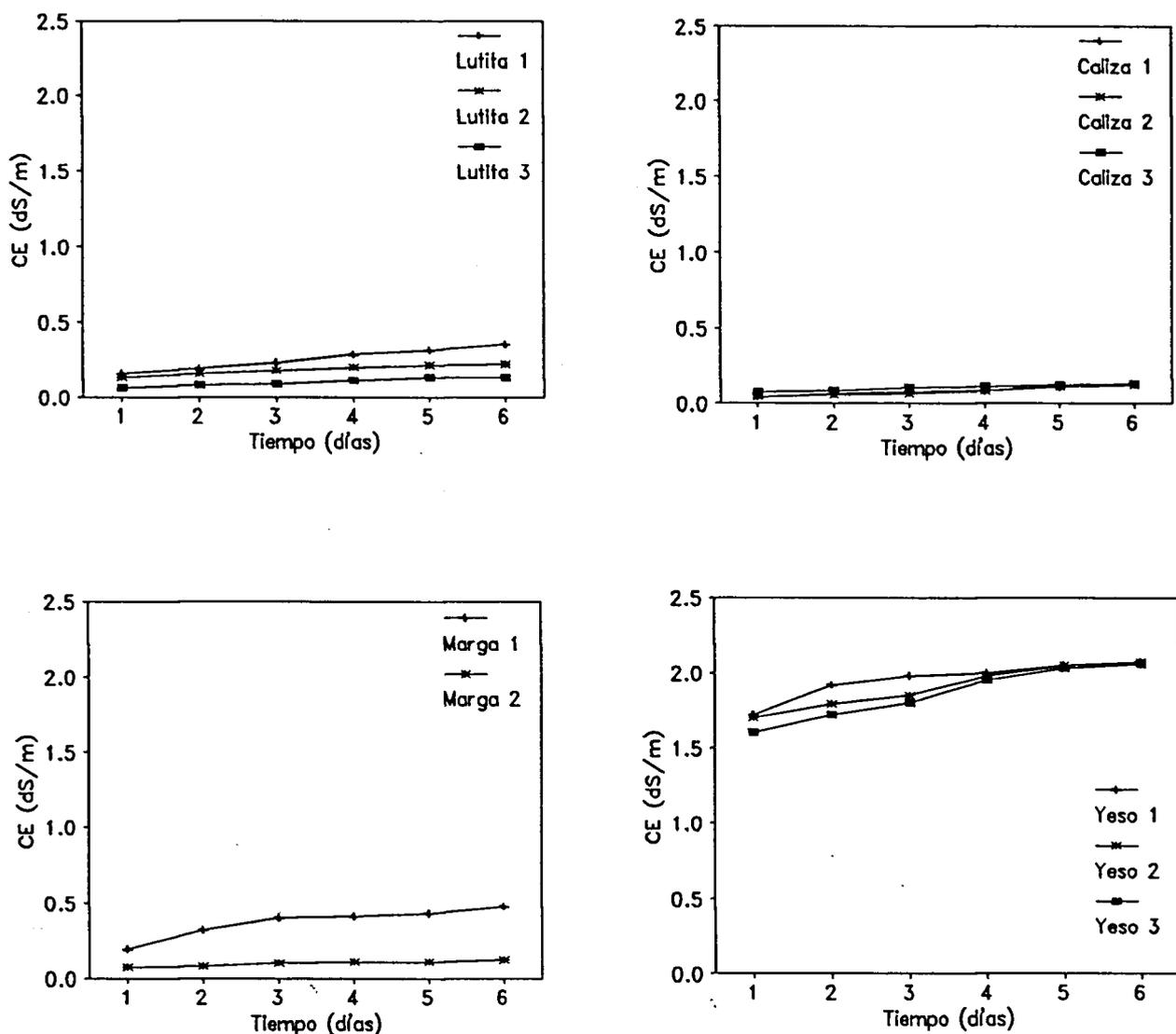


Figura 29. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 3: evolución temporal de la CE (dS/m) de las soluciones (5 g de material litológico/L de agua desionizada).

Tabla 28. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 3. Valores finales (t = 6 días) de CE (dS/m), pH e iones principales (meq/L) medidos en las soluciones de 5 g de material/L de agua desionizada (CE < 0.01 dS/m).

SOLUCION 1								
MATERIAL	Ca	Mg	Na	SO ₄	Cl	HCO ₃ ⁻	CE	pH
	meq L ⁻¹						dS/m	
Lutita 1	2.92	0.62	0.11	3.16	0.10	0.39	0.44	7.94
Lutita 2	1.56	0.55	0.12	1.18	0.08	0.97	0.28	7.92
Lutita 3	1.30	0.60	0.10	1.20	0.08	0.72	0.15	8.18
Caliza 1	1.91	0.14	0.05	1.35	0.06	0.69	0.23	8.22
Caliza 2	0.98	0.05	0.03	0.82	0.05	0.19	0.12	8.21
Caliza 3	1.58	0.15	0.04	0.63	0.05	1.09	0.36	8.09
Marga 1	3.05	0.40	0.10	2.74	0.08	0.73	0.44	8.10
Marga 2	1.24	0.55	0.06	0.55	0.05	1.25	0.12	8.49
Yeso 1	36.50	0.08	0.02	32.98	0.02	3.60	2.07	7.23
Yeso 2	37.70	0.11	0.03	32.81	0.03	5.00	2.07	7.34
Yeso 3	36.85	0.18	0.03	32.42	0.06	4.58	2.06	7.56

* Estimado por diferencia de $\Sigma_{\text{cat}} - \Sigma_{\text{an}}$

Tabla 29. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 3: Parámetros estimados por el modelo WQ4F en base al análisis iónico de las soluciones (5 g material/L agua desionizada) de equilibrio (t= 6 días) de los distintos materiales litológicos. TDS agua desionizada = 0 mg/L

	Lut1	Lut2	Lut3	Cal1	Cal2	Cal3	Mar1	Mar2	Yes1	Yes2	Yes3
TDS (ppm)	248	159	140	150	74	133	247	137	2537	2640	2580
I (mMol/L) †	6.1	3.6	3.3	3.5	1.9	2.8	5.9	2.9	47.3	48.7	47.8
Ca⁺² (mMol/L)	1.27	0.72	0.60	0.88	0.46	0.75	1.34	0.58	12.2	12.6	12.3
CaSO₄[°] (mMol/L)	0.18	0.05	0.04	0.07	0.03	0.03	0.17	0.02	5.9	5.9	5.8
CaHCO₃⁻ (mMol/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.25	0.35	0.31
CaCO₃[°] (mMol/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	0.04	0.06
Mg⁺² (mMol/L)	0.27	0.26	0.28	0.07	0.02	0.07	0.18	0.26	0.03	0.04	0.06
MgSO₄[°] (mMol/L)	0.03	0.01	0.02	-	-	-	0.02	-	0.01	0.02	0.03
Na⁺ (mMol/L)	0.11	0.12	0.10	0.05	0.03	0.04	0.10	0.06	0.02	0.03	0.03
HCO₃⁻ (mMol/L)	0.38	0.93	0.70	0.66	0.18	1.05	0.69	1.17	3.31	5.01	4.14
H₂CO₃[°] (mMol/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.36	0.38	0.21
SO₄⁻ (mMol/L)	1.36	0.53	0.54	0.61	0.38	0.29	1.18	0.25	10.7	10.5	10.4
Cl⁻ (mMol/L)	0.10	0.08	0.08	0.06	0.05	0.05	0.08	0.05	0.02	0.03	0.06
Log (PAI/Kt)											
Anhidrita	-	-	-	-	-	-	-	-	0.10	0.10	0.10
Aragonito	-0.6	-0.1	-0.6	-0.2	-0.9	-0.1	-0.1	0.20	0.44	0.70	0.87
Calcita	-0.4	0.02	-0.4	0.00	-0.8	0.02	0.05	0.35	0.59	0.85	1.01
Dolomita	-	-0.4	-	-	-	-	-0.7	0.39	-	-0.8	-0.2
Magnesita	-	-0.9	-	-	-	-	-	-0.5	-	-	-
Yeso	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.07	0.06

†I: Fuerza iónica efectiva

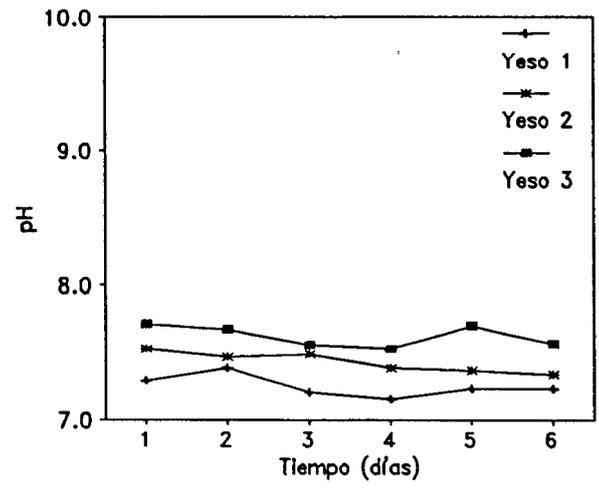
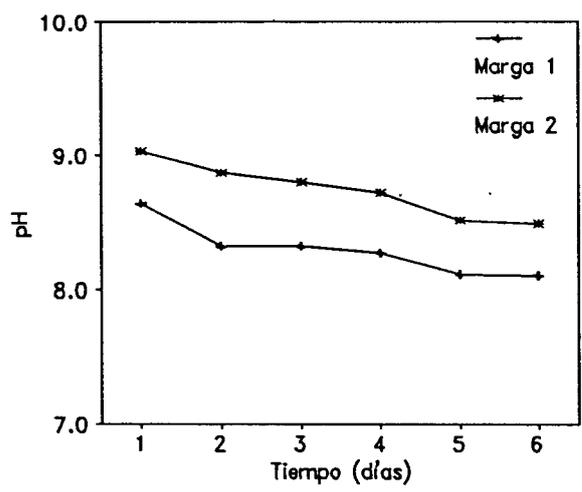
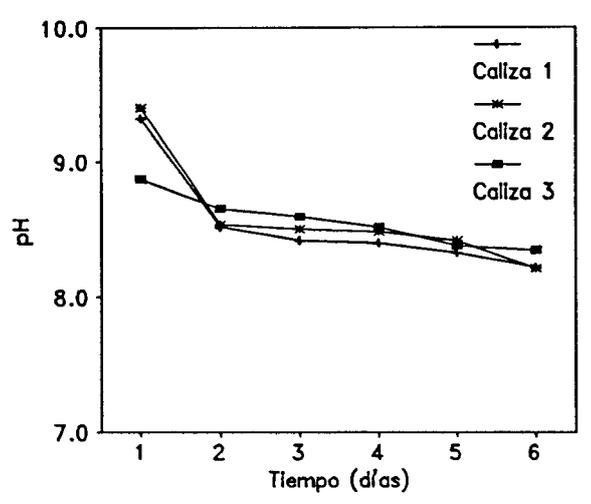
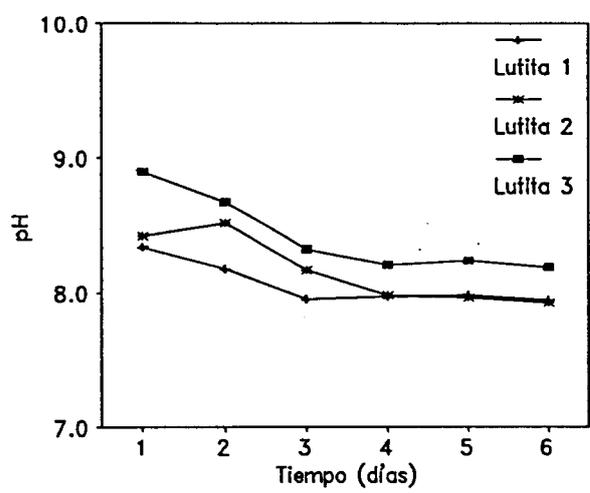


Figura 30. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 3: Evolución temporal del pH de las soluciones (5 g de material litológico/L de agua desionizada).

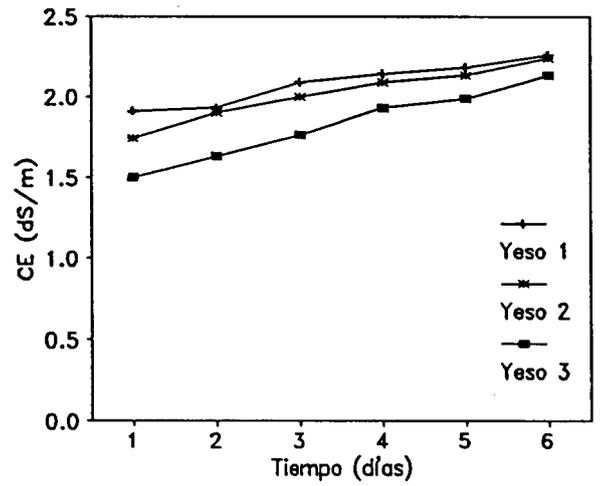
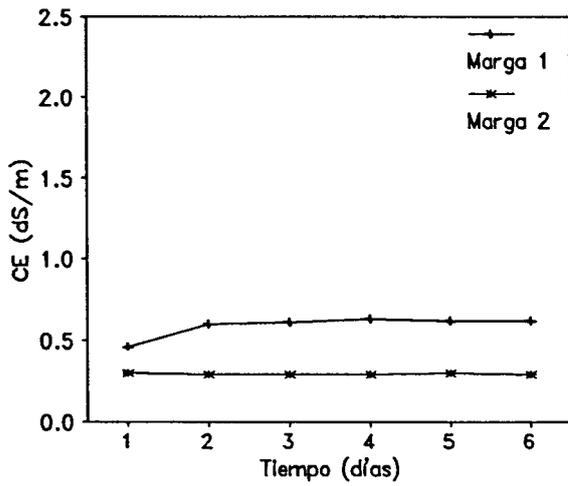
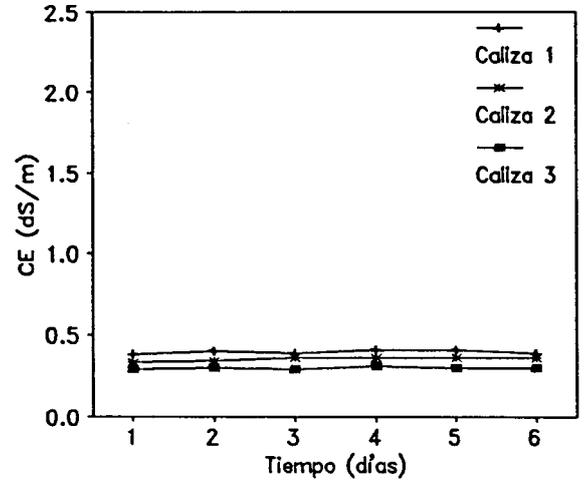
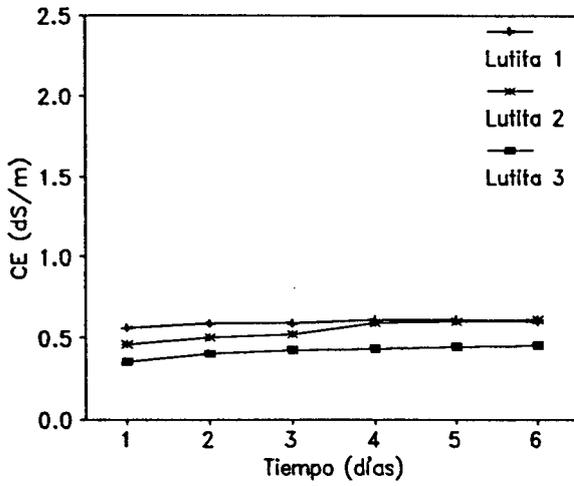


Figura 31. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 3: Evolución temporal de la CE(dS/m) de las soluciones (5 g de material litológico/L de agua del Canal de Monegros).

Tabla 30. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 3. Valores finales (t = 6 días) de CE (dS/m), pH e iones principales (meq/L) medidos en las soluciones de 5 g de material/L de agua del Canal de Monegros (CE = 0.31 dS/m).

SOLUCION 2								
MATERIAL	Ca	Mg	Na	SO ₄	Cl	HCO ₃ [*]	CE	pH
	meq L ⁻¹						dS/m	
Lutita 1	4.08	0.94	0.87	3.80	0.33	1.76	0.60	8.13
Lutita 2	3.62	0.96	1.60	3.40	1.52	1.26	0.61	8.12
Lutita 3	2.13	0.98	1.17	1.97	0.31	2.00	0.45	8.20
Caliza 1	2.76	0.72	0.39	2.21	0.31	1.35	0.39	8.02
Caliza 2	2.75	0.70	0.40	2.12	0.38	1.35	0.36	8.02
Caliza 3	2.24	0.70	0.38	1.28	0.33	1.71	0.30	8.09
Marga 1	3.45	0.83	0.65	3.28	0.31	1.34	0.62	8.02
Marga 2	1.84	0.97	0.38	1.17	0.30	1.72	0.29	8.26
Yeso 1	36.05	0.62	0.60	32.67	0.33	4.27	2.26	7.98
Yeso 2	33.95	0.62	0.41	33.16	0.38	1.44	2.24	7.98
Yeso 3	37.25	0.79	0.56	33.18	0.33	5.09	2.13	7.95

* Estimado por diferencia de $\Sigma_{\text{cat}} - \Sigma_{\text{an}}$

Tabla 31. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 1: Parámetros estimados por el modelo WQ4F en base al análisis iónico de las soluciones (5 g material/L solución CaCO₃ de CE = 0.22 dS/m) de equilibrio (t = 6 días) de los distintos materiales litológicos. TDS solución calcita = 162 mg/L.

	Lut1	Lut2	Lut3	Cal1	Cal2	Cal3	Mar1	Mar2	Yes1	Yes2	Yes3
TDS (ppm)	287	287	199	191	193	161	261	170	2471	2462	2193
I (mMol/L) [†]	6.8	6.8	4.2	4.2	4.3	3.7	5.9	3.5	46.2	46.1	42.5
Ca ⁺² (mMol/L)	1.46	1.47	0.91	1.09	1.11	0.90	1.41	0.73	9.4	9.6	10.6
CaSO ₄ [°] (mMol/L)	0.22	0.21	0.05	0.07	0.08	0.07	0.16	0.02	5.8	5.9	5.3
Mg ⁺² (mMol/L)	0.29	0.29	0.30	0.07	0.07	0.12	0.18	0.31	0.03	0.03	0.06
MgSO ₄ [°] (mMol/L)	0.04	0.04	0.01	-	-	-	0.02	-	0.02	0.02	0.03
Na ⁺ (mMol/L)	0.11	0.11	0.11	0.06	0.07	0.05	0.09	0.06	0.03	0.03	0.05
HCO ₃ ⁻ (mMol/L)	0.71	0.73	0.15	1.18	1.07	0.73	1.11	1.56	0.09	0.09	0.60
SO ₄ ⁻ (mMol/L)	1.43	1.40	0.46	0.58	0.64	0.62	1.04	0.25	13.5	13.3	10.4
Cl ⁻ (mMol/L)	0.05	0.08	0.11	0.05	0.08	0.09	0.07	0.04	0.03	0.04	0.05
	Log (PAI/Kt)										
Anhidrita	-	-	-	-	-	-	-	-	0.10	0.10	0.06
Aragonito	-0.1	0.00	-0.2	0.03	0.02	0.00	0.11	0.26	-0.7	-0.7	0.19
Calcita	0.04	0.11	0.00	0.18	0.17	0.13	0.25	0.40	-0.6	-0.5	0.33
Dolomita	-0.6	-0.5	-0.5	-0.8	-0.8	-0.6	-0.4	0.47	-	-	-
Magnesita	-	-1.0	-0.9	-	-	-	-	-0.4	-	-	-
Yeso	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.06	0.02

[†]I: Fuerza iónica efectiva

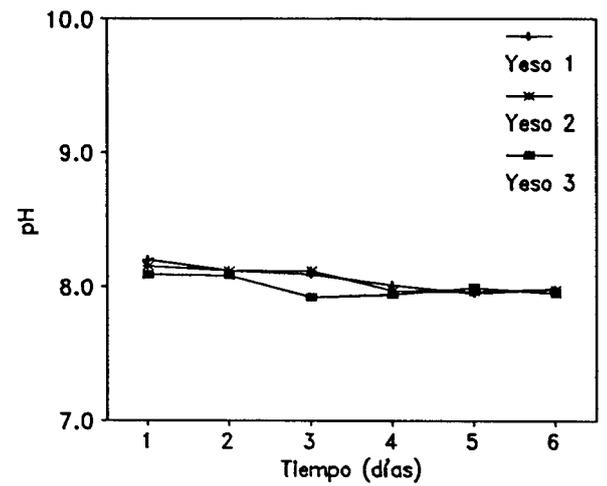
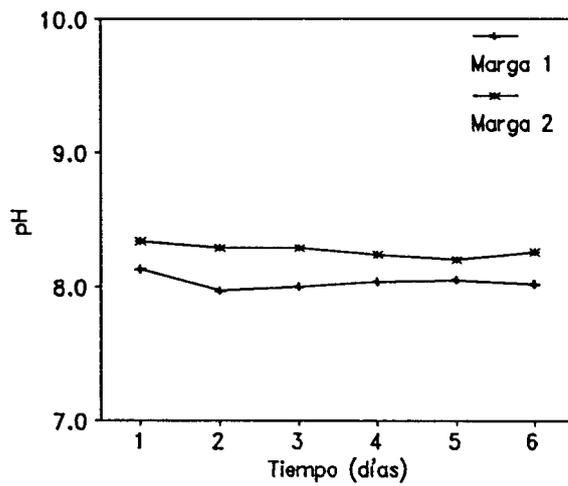
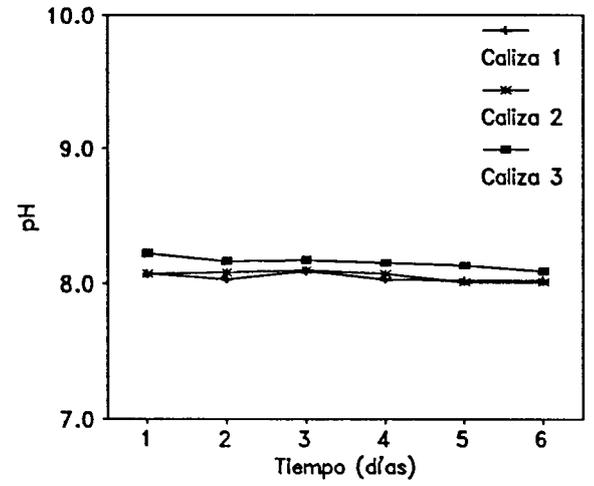
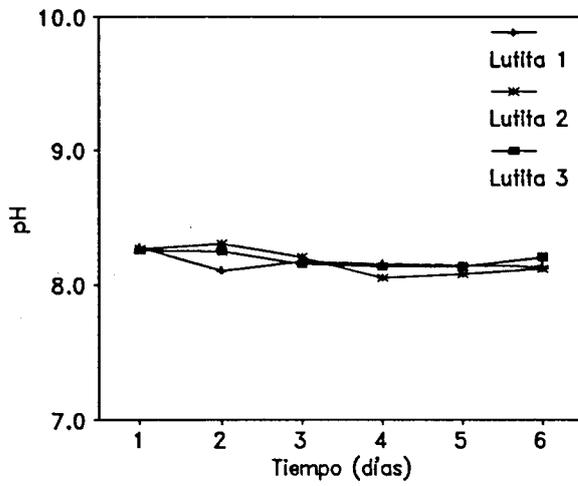


Figura 32. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 3: Evolución temporal del pH de las soluciones (5 g de material litológico/L de agua del Canal de Monegros).

Tabla 32. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 3. Valores finales (t = 6 días) de CE (dS/m), pH e iones principales (meq/L) medidos en las soluciones de 5 g de material/L de agua salina (CE = 5.83 dS/m; I = 10.8).

SOLUCION 3								
MATERIAL	Ca	Mg	Na**	SO ₄	Cl	HCO ₃ *	CE	pH
	meq L ⁻¹						dS/m	
Lutita 1	2.92	1.70	57.06	5.55	55.74	0.39	6.42	8.15
Lutita 2	2.30	1.30	59.77	5.40	57.00	0.97	6.44	8.19
Lutita 3	2.52	0.82	58.31	5.23	55.70	0.72	6.33	8.32
Caliza 1	3.10	1.80	47.49	1.50	50.20	0.69	6.17	8.47
Caliza 2	2.86	1.60	48.13	1.90	50.50	0.19	6.18	8.47
Caliza 3	2.04	1.20	55.11	1.46	55.80	1.09	6.12	8.59
Marga 1	3.20	0.45	59.90	2.58	54.26	6.71	6.26	8.25
Marga 2	1.97	0.85	59.80	0.52	53.63	8.47	6.08	8.54
Yeso 1	43.35	0.14	59.50	40.94	52.44	9.61	8.30	7.16
Yeso 2	43.55	0.00	58.70	41.16	52.67	8.42	8.28	7.41
Yeso 3	37.60	0.10	59.25	40.60	53.32	3.03	8.25	7.62

* Datos procedentes de la disolución con agua destilada.

** Estimado por diferencia de $\Sigma_{cat} - \Sigma_{an}$

Tabla 33. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 3: Parámetros estimados por el modelo WQ4F en base al análisis iónico de las soluciones (5 g material/L agua canal de Monegros) de equilibrio (t = 6 días) de los distintos materiales litológicos. TDS agua canal de Monegros = 213 mg/L.

	Lut1	Lut2	Lut3	Cal1	Cal2	Cal3	Mar1	Mar2	Yes1	Yes2	Yes3
TDS (ppm)	415	415	309	273	271	240	345	229	2585	2391	2685
I (mMol/L)[†]	8.9	9.0	6.2	6.0	6.0	5.0	7.6	4.8	47.9	45.6	49.3
Ca⁺² (mMol/L)	1.74	1.57	0.95	1.23	1.23	1.03	1.49	0.84	12.0	11.2	12.4
CaSO₄[°] (mMol/L)	0.26	0.21	0.09	0.12	0.12	0.06	0.21	0.05	5.70	5.65	5.84
Mg⁺² (mMol/L)	0.41	0.42	0.44	0.33	0.32	0.32	0.37	0.45	0.21	0.21	0.27
MgSO₄[°] (mMol/L)	0.05	0.05	0.04	0.03	0.03	0.02	0.04	0.02	0.09	0.09	0.11
Na⁺ (mMol/L)	0.86	1.59	1.17	0.39	0.40	0.38	0.65	0.38	0.59	0.40	0.55
HCO₃⁻ (mMol/L)	1.66	1.19	1.90	1.29	1.29	1.64	1.28	1.63	3.69	1.25	4.40
SO₄⁻ (mMol/L)	1.58	1.43	0.86	0.95	0.91	0.56	1.39	0.51	10.6	10.9	10.7
Cl⁻ (mMol/L)	0.33	1.52	0.31	0.31	0.38	0.33	0.31	0.30	0.33	0.38	0.33
	Log (PAI/Kt)										
Anhidrita	-	-	-	-	-	-	-	-	0.09	0.09	0.10
Aragonito	0.39	0.19	0.29	0.06	0.06	0.16	0.12	0.25	1.23	0.74	1.29
Calcita	0.53	0.34	0.43	0.20	0.20	0.31	0.26	0.39	1.38	0.88	1.43
Dolomita	0.48	0.15	0.57	-0.1	-0.2	0.16	0.0	0.55	1.05	0.10	1.26
Magnesita	-0.5	-0.7	-0.3	-0.8	-0.8	-0.6	-0.8	-0.3	-0.8	-	-0.7
Yeso	-	-	-	-	-	-	-	-	0.05	0.05	0.06

[†]I: Fuerza iónica efectiva.

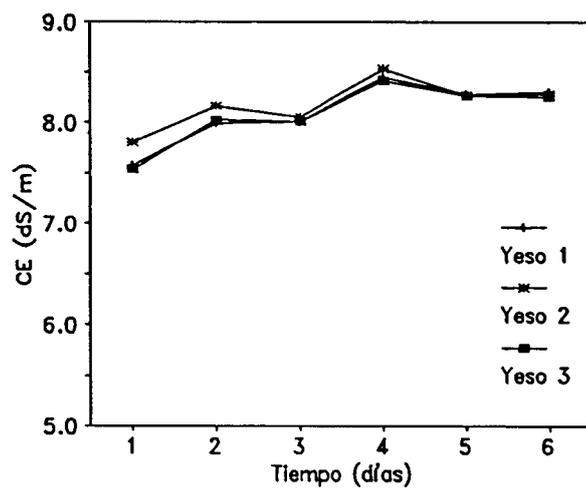
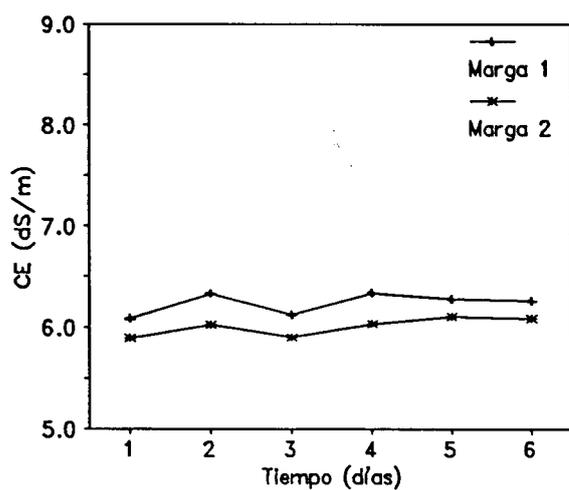
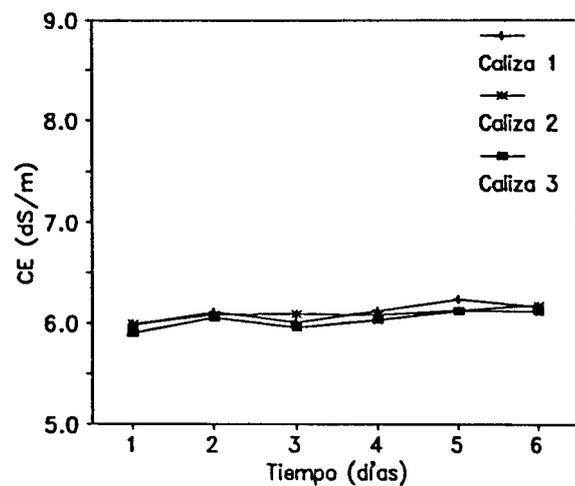
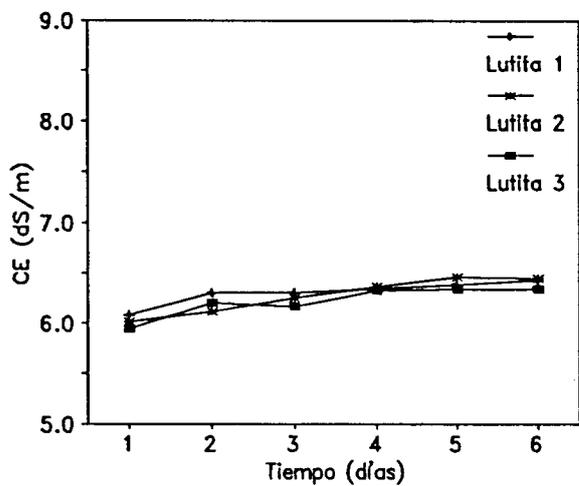


Figura 33. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 3: Evolución temporal de la CE(dS/m) de las soluciones (5 g de material litológico/L de agua salina).

Tabla 34. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 3. Valores finales (t = 6 días) de CE (dS/m), pH e iones principales (meq/L) medidos en las soluciones de 5 g de material/L de agua saturada en yeso (CE = 2.2 dS/m; I = 11.04).

SOLUCION 4								
MATERIAL	Ca	Mg	Na	SO ₄	Cl	HCO ₃ ⁺	CE	pH
	meq L ⁻¹						dS/m	
Lutita 1	32.30	0.72	0.26	33.95	0.16	<0	2.18	7.83
Lutita 2	31.50	0.80	0.25	34.00	0.16		2.20	7.90
Lutita 3	33.00	1.09	0.22	34.60	0.15		2.20	7.85
Caliza 1	32.50	0.16	0.16	33.44	1.36		2.17	7.77
Caliza 2	33.60	0.15	0.20	33.20	0.10	0.65	2.15	7.62
Caliza 3	34.40	0.17	0.18	32.80	0.08	1.87	2.14	7.79
Marga 1	34.25	0.48	0.11	36.87	0.08		2.15	7.73
Marga 2	34.20	1.23	0.09	32.55	2.25	1.02	2.17	7.90
Yeso 1	33.25	0.08	0.07	32.14	0.03	0.96	2.18	7.31
Yeso 2	34.10	0.11	0.08	32.16	0.30	1.83	2.15	7.42
Yeso 3	35.20	0.22	0.11	38.76	0.06		2.14	7.64

* Estimado por diferencia de $\Sigma_{\text{cat}} - \Sigma_{\text{an}}$

Tabla 35. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 3: Parámetros estimados por el modelo WQ4F en base al análisis iónico de las soluciones (5 g material/L solución de CaSO₄ de CE = 2.2 dS/m) de equilibrio (t = 6 días) de los distintos materiales litológicos. TDS solución yeso = 2076 mg/L.

	Lut1	Lut2	Lut3	Cal1	Cal2	Cal3	Mar1	Mar2	Yes1	Yes2	Yes3
TDS (ppm)	2298	2286	2347	2311	2318	2388	2469	2408	2272	2354	2575
I (mMol/L)[†]	44.3	43.9	45.3	44.4	44.5	45.3	46.9	46.5	43.7	44.8	48.4
Ca⁺² (mMol/L)	10.6	10.3	10.8	16.3	16.8	11.4	11.0	11.5	11.1	11.4	11.2
CaSO₄[°] (mMol/L)	5.6	5.5	5.7	5.8	5.7	5.7	6.2	5.6	5.5	5.6	6.5
Mg⁺² (mMol/L)	0.24	0.27	0.37	0.05	0.05	0.06	0.16	0.43	-	0.04	0.07
MgSO₄[°] (mMol/L)	0.12	0.13	0.18	0.03	0.02	0.03	0.08	0.19	-	0.02	0.04
Na⁺ (mMol/L)	0.25	0.24	0.21	0.16	0.19	0.18	0.11	0.09	0.07	0.08	0.11
HCO₃⁻ (mMol/L)	-	-	-	-	0.59	1.66	-	0.09	0.88	1.68	-
SO₄⁻ (mMol/L)	11.3	11.4	11.4	11.1	10.9	10.7	12.2	10.6	10.6	10.5	12.9
Cl⁻ (mMol/L)	0.16	0.16	0.15	1.36	0.10	0.08	0.08	2.25	0.03	0.30	0.06
	Log (PAI/Kt)										
Anhidrita	0.08	0.07	0.09	0.08	0.09	0.09	0.12	0.08	0.08	0.08	0.14
Aragonito	-	-	-	-	0.05	0.68	-	0.52	-0.1	0.32	-
Calcita	-	-	-	-	0.20	0.83	-	0.67	0.06	0.46	-
Dolomita	-	-	-	-	-	-0.6	-	-0.1	-	-	-
Yeso	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05	0.05	0.08	0.04	0.04	0.04	0.10

[†]I: Fuerza iónica efectiva

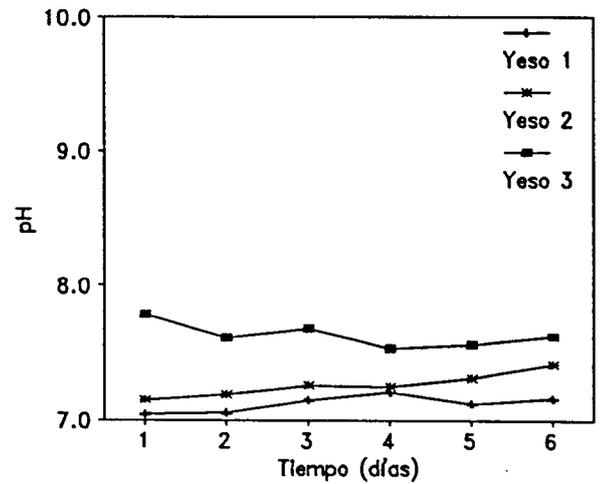
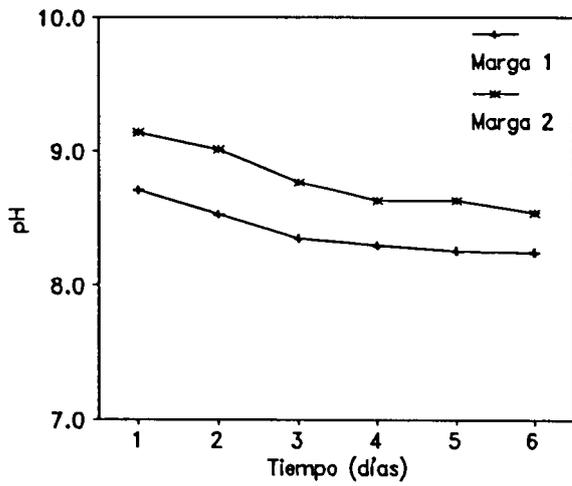
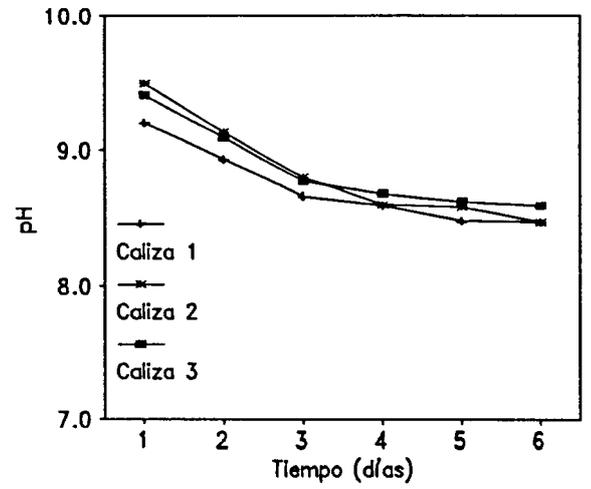
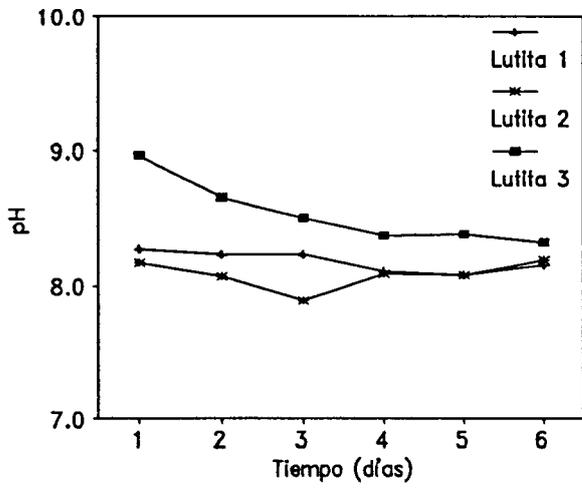


Figura 34. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 3: Evolución temporal del pH de las soluciones (5 g de material litológico/L de agua salina).

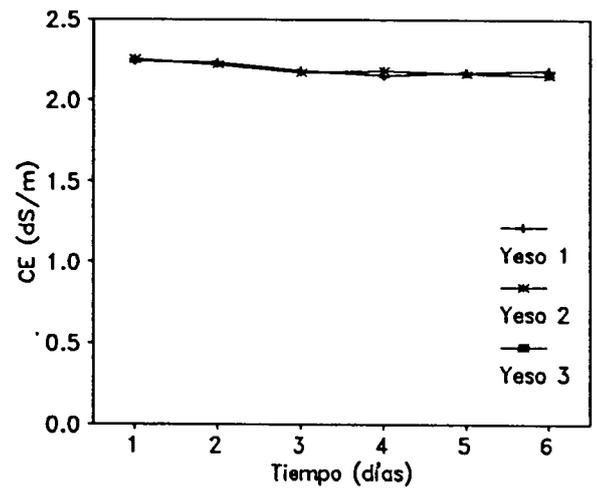
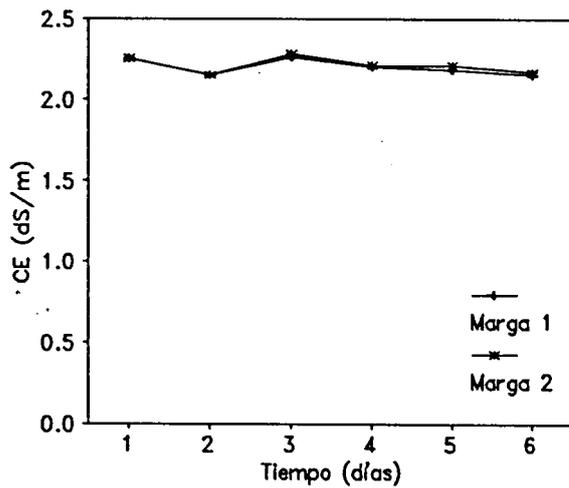
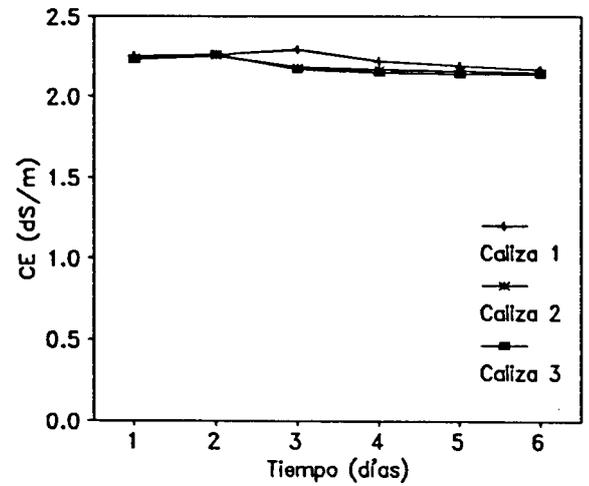
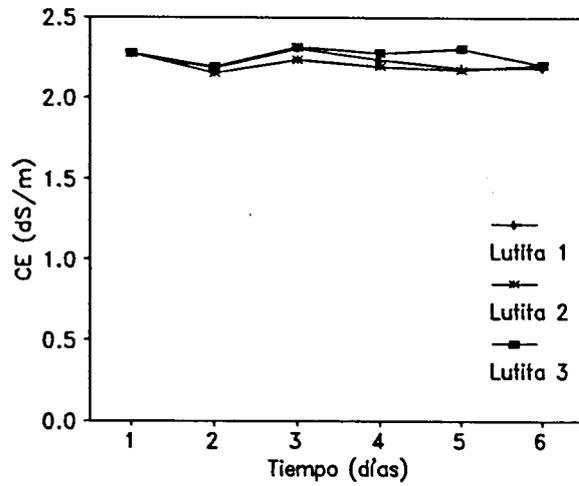


Figura 35. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 3: Evolución temporal de la CE(dS/m) de las soluciones (5 g de material litológico/L de agua saturada en yeso).

Tabla 36. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 3. Valores finales (t = 6 días) de CE (dS/m), pH e iones principales (meq/L) medidos en las soluciones de 5 g de material/L de agua saturada en calcita (CE = 0.22 dS/m).

SOLUCION 5								
MATERIAL	Ca	Mg	Na	SO ₄	Cl	HCO ₃ [*]	CE	pH
	meq L ⁻¹						dS/m	
Lutita 1	3.39	0.66	0.11	3.36	0.05	0.75	0.37	8.05
Lutita 2	3.39	0.65	0.11	3.30	0.08	0.77	0.41	8.11
Lutita 3	1.96	0.64	0.11	1.04	0.11	1.56	0.22	7.85
Caliza 1	2.38	0.15	0.06	1.31	0.05	1.23	0.24	8.06
Caliza 2	2.42	0.16	0.07	1.45	0.08	1.12	0.25	8.09
Caliza 3	1.96	0.25	0.05	1.40	0.09	0.77	0.18	8.30
Marga 1	3.18	0.39	0.09	2.43	0.07	1.16	0.33	8.08
Marga 2	1.55	0.65	0.06	0.57	0.04	1.65	0.17	8.33
Yeso 1	30.45	0.10	0.03	38.56	0.03		2.21	7.74
Yeso 2	30.80	0.09	0.03	38.22	0.04		2.21	7.76
Yeso 3	31.90	0.17	0.05	31.40	0.05	0.67	2.21	7.76

* Estimado por diferencia $\Sigma_{cat} - \Sigma_{an}$

Tabla 37. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 3: Parámetros estimados por el modelo WQ4F en base al análisis iónico de las soluciones (5 g material/L solución de NaCl de CE = 5.8 dS/m) de equilibrio (t = 6 días) de los distintos materiales litológicos. TDS solución NaCl = 3214 mg/L.

	Lut1	Lut2	Lut3	Cal1	Cal2	Cal3	Mar1	Mar2	Yes1	Yes2	Yes3
TDS (ppm)	3658	3765	3671	3070	3076	3437	3904	3869	6650	6580	6142
I (mMol/L)[†]	66	67	65	55	55	60	66	64	120	119	113
Ca⁺² (mMol/L)	1.34	1.05	1.16	1.50	1.38	0.09	1.45	0.88	15.6	15.7	13.6
CaSO₄[*] (mMol/L)	0.12	0.09	0.09	0.04	0.04	0.02	0.06	-	5.5	5.6	5.1
CaHCO₃⁺ (mMol/L)	-	-	-	-	-	-	0.05	0.04	0.65	0.57	0.18
CaCO₃⁰ (mMol/L)	-	-	-	-	-	0.01	0.04	0.06	0.04	0.07	0.03
Mg⁺² (mMol/L)	0.79	0.60	0.38	0.87	0.77	0.58	0.21	0.39	0.05	-	0.04
MgSO₄[*] (mMol/L)	0.06	-	0.03	0.02	0.23	0.01	-	-	-	-	0.01
Na⁺ (mMol/L)	56.9	59.7	58.2	47.5	48.2	55.2	59.8	59.7	58.3	57.7	58.1
NaSO₄⁻ (mMol/L)	0.22	0.23	0.22	0.05	0.07	0.06	0.14	0.03	1.40	1.40	1.50
NaHCO₃⁰ (mMol/L)	-	-	-	0.01	-	0.02	0.13	0.16	0.17	0.14	0.05
HCO₃⁻ (mMol/L)	0.36	0.89	0.65	0.60	0.16	0.94	6.16	7.50	8.73	7.60	2.72
H₂CO₃⁰ (mMol/L)	-	0.01	-	-	-	-	0.06	0.04	1.02	0.50	0.11
SO₄⁻ (mMol/L)	2.32	2.28	2.22	0.62	0.79	0.62	1.09	0.23	13.7	13.7	13.9
Cl⁻ (mMol/L)	55.9	57.2	55.9	50.3	50.6	56.0	54.4	53.8	52.8	53.0	53.7
	Log (PAI/Kt)										
Anhidrita	-	-	-	-	-	-	-	-	0.08	0.09	0.05
Aragonito	-0.6	-0.3	-0.2	0.01	-0.6	0.13	0.76	0.92	0.76	0.95	0.67
Calcita	-0.5	-0.1	-0.1	0.16	-0.4	0.27	0.91	1.07	0.91	1.10	0.81
Dolomita	-	-0.5	-0.6	0.14	-	0.37	1.02	1.83	-0.6	-	-0.9
Magnesita	-	-0.8	-	-0.5	-	-0.4	-0.4	-0.3	-	-	-
Yeso	-	-	-	-	-	-	-	-	0.04	0.05	0.00

[†]I: Fuerza iónica efectiva

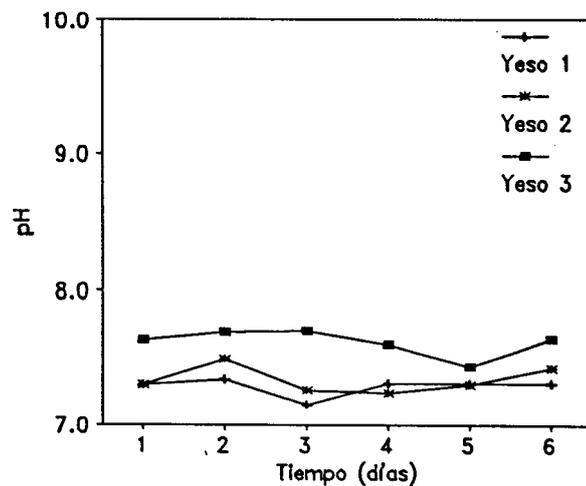
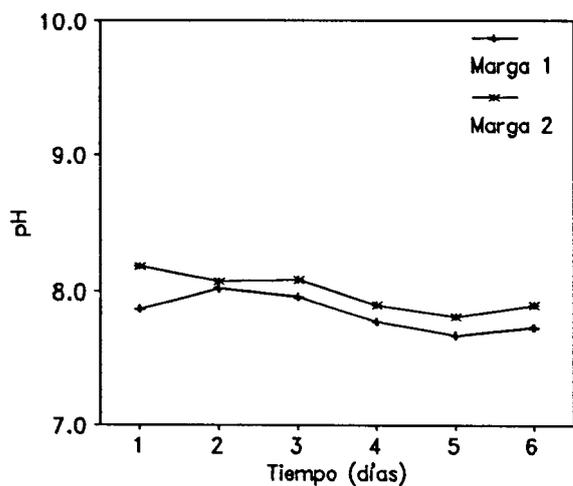
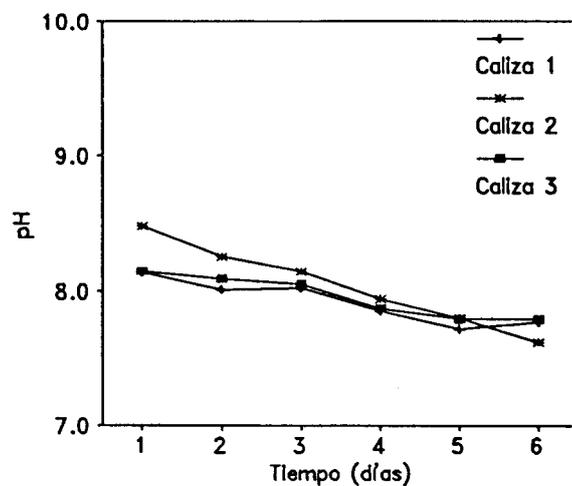
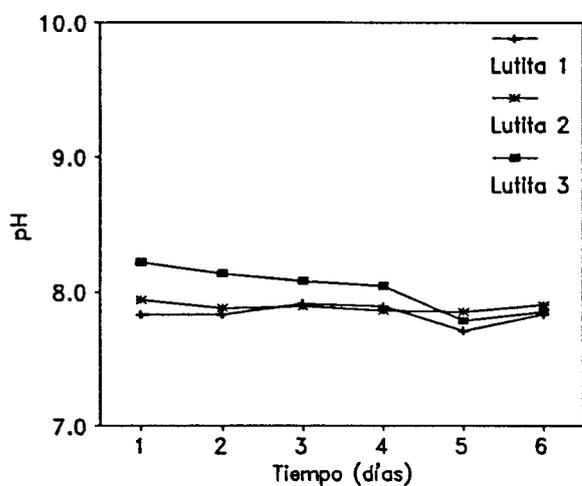


Figura 36. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 3: Evolución temporal del pH de las soluciones (5 g de material litológico/L de agua saturada en yeso).

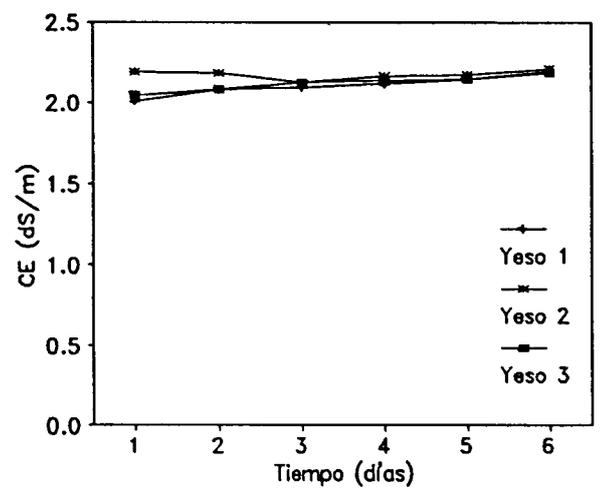
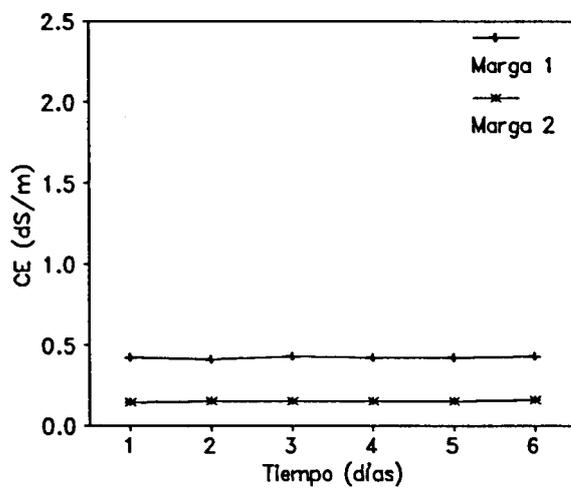
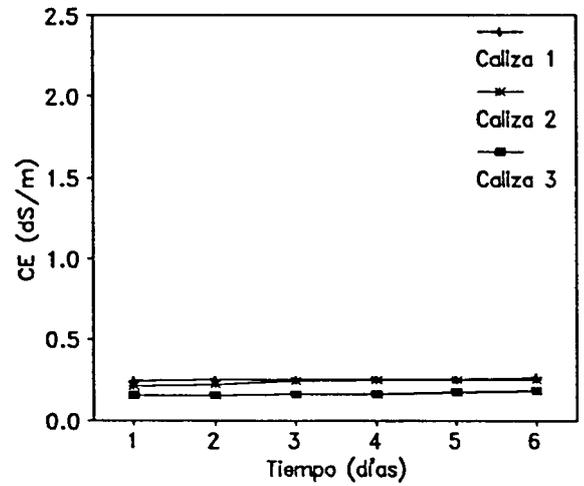
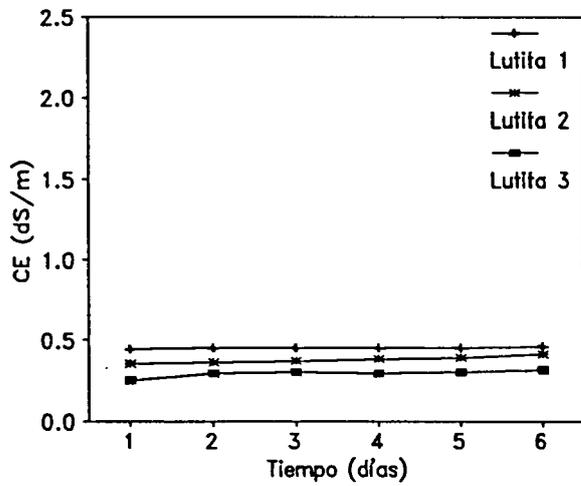


Figura 37. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 3: Evolución temporal de la CE(dS/m) de las soluciones (5 g de material litológico/L de agua saturada en calcita).

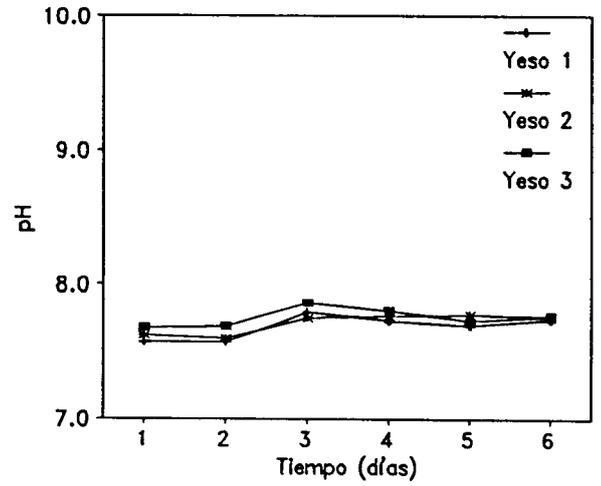
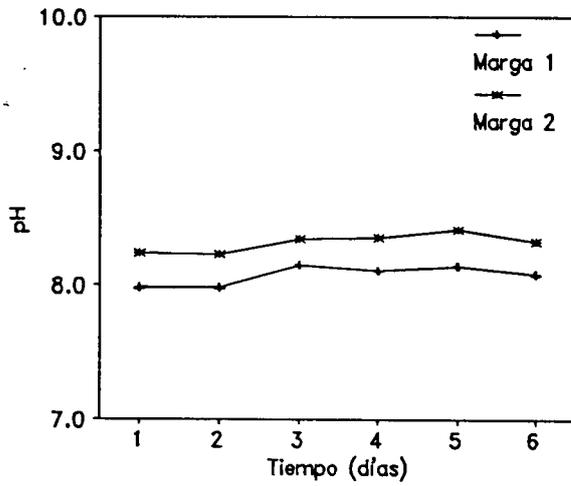
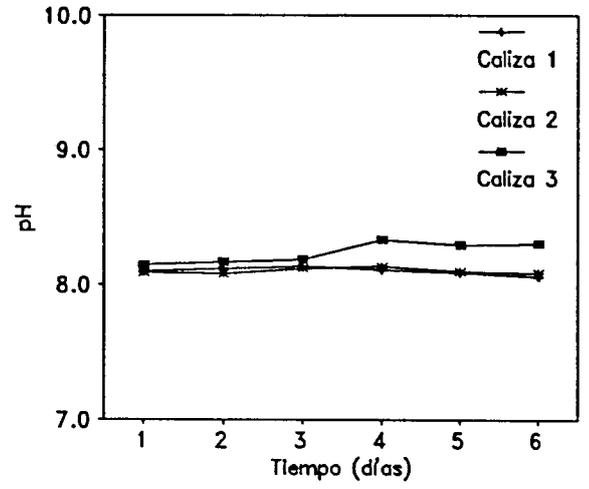
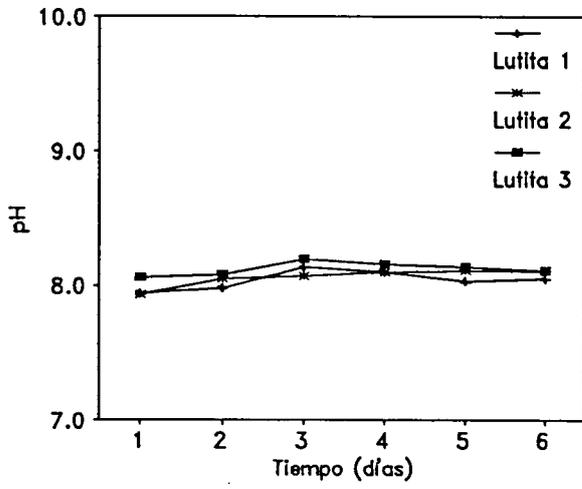


Figura 38. Salinidad de los materiales litológicos. Ensayo 3: Evolución temporal del pH de las soluciones (5 g de material litológico/L de agua saturada en calcita).

Por el contrario, los valores obtenidos con la solución saturada en yeso (SY) indican una mayor solubilidad de las lutitas, calizas y margas, ya que en este caso el efecto salino ($I_{sy} = 40.6 \text{ mMol/L}$) supera al efecto de ion común. No ocurre lo mismo con el yeso, donde la similitud de ambos iones (Ca y SO_4) hace que su solubilidad disminuya de forma drásticamente ($\text{TDS} = 324 \text{ mg/L}$ frente a los 2586 mg/L obtenidos en agua desionizada).

Finalmente, los valores de TDS obtenidos con la solución de NaCl (SS) son en todos los casos muy superiores a los obtenidos en agua desionizada, ya que en este caso no existe efecto de ion común y el efecto salino es importante ($I_{ss} = 55.2 \text{ mMol/L}$). El aumento de la solubilidad de los materiales litológicos debido al efecto salino se produce a causa del descenso de los coeficientes de actividad iónicos derivados del incremento de la fuerza iónica y a causa del incremento en la formación de pares iónicos (Tabla 37).

Los resultados obtenidos en este ensayo se sintetizan en la Figura 39, en la que se ha representado el porcentaje de variación del TDSi aportado por cada material litológico (Tabla 38) respecto al TDS_o obtenido en agua desionizada:

$$\frac{[(\text{TDSi}-\text{TDS}_o)/\text{TDS}_o] \times 100}{(9)}$$

La Figura 39 indica que en la solución de calcita (SC) los mayores descensos relativos de TDS se producen en las calizas y margas (-83% y -72%, respectivamente). El menor descenso (-14%) se produce en el yeso. Este descenso es similar al obtenido por Tanji (1969) en una solución 5 mM de CaCl_2 (-12%). En el agua del canal de Monegros (AM), calizas y margas son de nuevo las de mayor descenso (-60%), en tanto que las lutitas y yesos descienden en torno al 9%. Para soluciones más concentradas (SY y SS) predomina el efecto de fuerza iónica en lutitas, calizas y margas, produciéndose incrementos relativos de TDS de hasta el 250% para las margas en SS. En el caso del yeso el TDS aumenta un 25% en la solución salina, valor similar (+27%) al obtenido por Tanji (1969) en una solución 50 mM de NaCl.

Los resultados obtenidos en este ensayo sugieren, en definitiva, que los sólidos disueltos por los materiales litológicos analizados son bajos o moderados (con la excepción del yeso) y que su equilibrado con soluciones de calcita y con el agua del Canal de Monegros, situaciones más comunes en el área de estudio, hace que dichos aportes disminuyan por efecto del ion común. Por el contrario, el contacto de los materiales litológicos con aguas salinas o saturadas en yeso incrementa sustancialmente los sólidos disueltos totales en todos los materiales excepto en el yeso.

Tal como se discutirá en el capítulo siguiente, los valores de TDS resultantes contrastan con las elevadas salinidades de la mayoría de las aguas subterráneas localizadas en Monegros II. Una explicación a dicho contraste puede ser que el tiempo de residencia del agua en estos medios de baja permeabilidad es de un orden de magnitud superior al utilizado en estos ensayos. En dichas condiciones, los aportes de sales (principalmente de los yesos), los procesos de intercambio (principalmente con las lutitas) y el control del ion Ca por la fase sólida pueden explicar, al menos conceptualmente, los incrementos salinos y los valores elevados de los iones Mg y Na. Asimismo, no puede descartarse la presencia de otros materiales litológicos no muestreados, capaces de aportar mayores cantidades de sólidos solubles. En este sentido, debe recalarse que las muestras analizadas proceden de testigos de sondeo puntuales, por lo que no pueden considerarse las únicas representativas de formaciones geológicas que se caracterizan por las variaciones laterales de facies y por la variabilidad en las condiciones sedimentarias.

Tabla 38. Valores de TDS aportados por el material litológico en solución con los disolventes SC = solución saturada en caliza, AM = agua del Canal de Monegros, SY = solución saturada en yeso, SS = solución de NaCl (CE = 5.8 dS/m).

	TDS (mg/L)			
	Lutita	Caliza	Marga	Yeso
SC	96	20	54	2213
AM	167	48	74	2341
SY	234	263	362	324
SS	484	367	672	3243

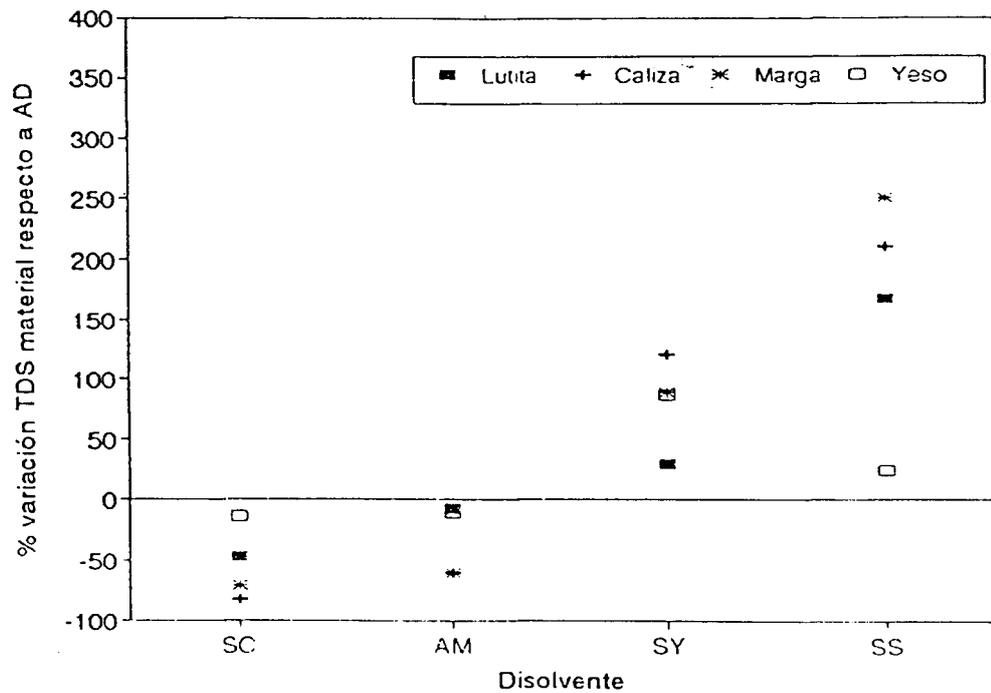


Figura 39. Porcentaje de variación del TDS (mg/L) del material aportado en los diferentes disolventes (AC,AM,SY,SS) con respecto al aportado en AD.

4.4.3. Prospección geoelectrica Wenner

Sectores I y II

Las Tablas 39 a 41 resumen los resultados obtenidos en las tres campañas de muestreo (Septiembre 87, Abril 88 y Julio 89). La CE aparente (CE_a) y la CE aparente acumulada (CE_{ac}) se han calculado para las distintas profundidades (distancias interelectródicas) desde 1 a 8 m, según los métodos 1 (Halvorson y Rhoades, 1974) y 2 (Moore, 1945) descritos en 4.3.3.

Estos resultados se han obtenido bajo condiciones aproximadas de humedad de referencia ("capacidad de campo"), si bien este término no es una propiedad intrínseca del suelo. A esta variabilidad se une la del tipo de suelo y subsuelo y la de las posiciones topográficas y geomorfológicas de cada punto en consideración (Tabla 18), así como la de las condiciones de humedad precedentes. Este último aspecto no es sin embargo importante cuando se comparan las medidas realizadas en diferentes fechas de muestreo, ya que la forma de la curva característica no varía de forma sustancial (Halvorson y Rhoades, 1974).

Los valores de CE_a presentan ligeras diferencias entre puntos y entre épocas de medida. Los máximos los presentan los puntos W-1, W-2 y W-3 con valores de CE_a medios del perfil generalmente superiores a 1 dS/m. Es interesante resaltar que estos tres puntos se encuentran localizados dentro de la Formación Zaragoza, que es la de mayor contenido en sales de acuerdo con los ensayos realizados en los distintos materiales litológicos (capítulo 3.4.4.2). Estos valores de CE_a se corresponden, según Bouwer (1978), con rocas sedimentarias y materiales no consolidados y, en particular, con margas y lutitas más o menos saturadas con aguas de salinidad media. En la Fm. Alcubierre, los valores medios de CE_a del perfil no superan los 0.6 dS/m (puntos W4 a W8) y los valores puntuales obtenidos para los horizontes superficiales son característicos de las calcitas (Bouwer, 1978). Asimismo, de las Figuras 40 y 41 puede concluirse que el tipo de curva " CE_a -profundidad" que se obtiene para cada punto tiene un perfil bastante parecido en las tres fechas de muestreo, lo cual sugiere que el método utilizado es suficientemente reproducible.

Los tipos de curva " CE_a -a" o perfiles de CE_a obtenidos permiten clasificar los puntos de muestreo en dos grupos: (1) puntos donde la CE_a desciende con la profundidad y (2) puntos donde la CE_a aumenta con la profundidad.

El primer grupo es representativo de áreas de descarga con presencia de capas freáticas u horizontes relativamente impermeables más o menos superficiales, que inducen al ascenso capilar del agua y a la acumulación superficial de sales por efecto de la evapoconcentración del agua. Estas sales pueden redistribuirse a mayor o menor profundidad en función de las características hidráulicas del suelo y subsuelo y del régimen e intensidad de la precipitación, pero se mantienen generalmente en la parte superior del perfil, dado el balance hídrico negativo ($ET > P$) de la zona (Capítulo 2).

Debe esperarse que estas áreas correspondan a zonas topográficamente deprimidas o vales que sostienen generalmente aguas subsuperficiales. A este primer grupo pertenecen los puntos W1, W3, W4, W5 y W6, todos ellos situados efectivamente en vales, excepto el W5, que está situado a media ladera (Tabla 18).

Tabla 39. Prospección geoelectrica Wenner. Valores de CE aparente y CE acumulada (CE_a y CE_{ac} , dS/m), del perfil de los puntos W-1, W-2 y W-3 para distintas profundidades y fechas de muestreo.

PUNTO W-1 Prof.(m)	CE_a			CE_{ac}		
	Sept 87	Abr 88	Jul 89	Sept 87	Abr 88	Jul 89
1	1.59	0.97	0.82	1.59	0.97	0.82
2	1.30	1.53	1.17	2.89	2.50	1.99
3	1.12	1.29	0.83	4.01	3.79	2.82
4	0.99	1.17	0.79	5.00	4.96	3.61
5	0.93	1.09	0.83	5.94	6.05	4.45
6	0.95	0.98	0.80	6.89	7.03	5.25
7	0.94	0.87	0.76	7.83	7.90	6.01
8	0.83	0.86	0.70	8.66	8.76	6.71
media	1.08	1.10	0.84			
CV (%)	22	20	16			
PUNTO W-2 Prof.(m)	CE_a			CE_{ac}		
	Sept 87	Abr 88	Jul 89	Sept 87	Abr 88	Jul 89
1	1.23	0.70	0.97	1.23	0.70	0.97
2	1.28	1.14	1.35	2.51	1.84	2.32
3	1.23	1.29	1.33	3.75	3.13	3.64
4	1.14	1.33	1.24	4.88	4.46	4.89
5	1.06	1.22	1.09	5.94	5.68	5.98
6	1.09	1.38	1.10	6.86	7.06	7.00
7	0.91	1.03	0.99	7.77	8.10	7.99
8	0.99	0.99	0.99	8.76	9.09	8.98
media	1.12	1.14	1.13			
CV (%)	11	18	13			
PUNTO W-3 Prof.(m)	CE_a			CE_{ac}		
	Sept 87	Abr 88	Jul 89	Sept 87	Abr 88	Jul 89
1	1.46	1.83	1.53	1.46	1.83	1.53
2	1.39	1.32	1.59	2.85	3.15	3.12
3	1.16	1.13	0.96	4.01	4.28	4.08
4	0.95	0.99	1.05	4.96	5.28	5.13
5	0.99	0.99	0.94	5.95	6.27	6.07
6	0.93	0.95	0.88	6.88	7.22	6.95
7	0.89	0.87	0.84	7.77	8.09	7.79
8	0.92	0.90	0.86	8.69	9.01	8.66
media	1.09	1.12	1.08			
CV (%)	19	27	26			

Tabla 40. Prospección geoelectrica Wenner. Valores de CE aparente y CE acumulada (CE_a y CE_{ac} , dS/m) del perfil de los puntos W-4, W-5 y W-6 para distintas profundidades y fechas de muestreo.

PUNTO W-4 Prof.(m)	CE_a			CE_{ac}		
	Sept 87	Abr 88	Jul 89	Sept 87	Abr 88	Jul 89
1	0.39	0.36	0.35	0.39	0.36	0.36
2	0.29	0.31	0.26	0.69	0.67	0.62
3	0.26	0.24	0.25	0.95	0.93	0.88
4	0.22	0.23	0.23	1.18	1.17	1.11
5	0.29	0.27	0.30	1.47	1.44	1.45
6	0.23	0.25	0.31	1.70	1.70	1.76
7	0.23	0.26	0.32	1.93	1.96	2.08
8	0.28	0.27	0.35	2.22	2.23	2.43
media	0.27	0.27	0.30			
CV (%)	19	14	14			
PUNTO W-5 Prof.(m)	CE_a			CE_{ac}		
	Sept 87	Abr 88	Jul 89	Sept 87	Abr 88	Jul 89
1	0.45	0.43	0.43	0.45	0.43	0.43
2	0.43	0.39	0.41	0.88	0.83	0.84
3	0.41	0.39	0.39	1.29	1.22	1.23
4	0.37	0.44	0.37	1.66	1.66	1.61
5	0.42	0.47	0.37	2.08	2.13	1.98
6	0.45	0.54	0.41	2.53	2.67	2.40
7	0.51	0.58	0.44	3.04	3.25	2.84
8	0.55	0.60	0.50	3.59	3.85	3.34
media	0.45	0.48	0.42			
CV (%)	12	16	10			
PUNTO W-6 Prof.(m)	CE_a			CE_{ac}		
	Sept 87	Abr 88	Jul 89	Sept 87	Abr 88	Jul 89
1	0.33	0.42	0.42	0.33	0.42	0.42
2	0.24	0.21	0.34	0.57	0.64	0.76
3	0.26	0.27	0.32	0.83	0.91	1.08
4	0.36	0.35	0.31	1.19	1.27	1.39
5	0.42	0.41	0.32	1.61	1.68	1.71
6	0.64	0.57	0.38	2.25	2.26	2.09
7	0.75	0.67	0.48	3.00	2.93	2.58
8	0.81	0.73	0.47	3.81	3.66	3.05
media	0.48	0.45	0.38			
CV (%)	44	38	17			

Tabla 41. Prospección geoelectrica Wenner. Valores de CE aparente y CE acumulada (CE_a y CE_{ac} , dS/m) del perfil de los puntos W-7 y W-8 para distintas profundidades y fechas de muestreo.

PUNTO W-7 Prof.(m)	CE_a			CE_{ac}		
	Sept 87	Abr 88	Jul 89	Sept 87	Abr 88	Jul 89
1	0.13	0.15	0.09	0.13	0.15	0.09
2	0.13	0.13	0.11	0.26	0.28	0.20
3	0.18	0.16	0.18	0.44	0.45	0.38
4	0.27	0.22	0.13	0.71	0.67	0.52
5	0.36	0.35	0.21	1.08	1.03	0.73
6	0.40	0.39	0.28	1.48	1.42	1.01
7	0.45	0.45	0.21	1.94	1.87	1.22
8	0.55	0.45	0.23	2.49	2.32	1.55
media	0.31	0.29	0.18			
CV (%)	47	45	34			
PUNTO W-8 Prof.(m)	CE_a			CE_{ac}		
	Sept 87	Abr 88	Jul 89	Sept 87	Abr 88	Jul 89
1	0.13	0.40	0.51	0.13	0.40	0.51
2	0.14	0.39	0.47	0.27	0.79	0.99
3	0.23	0.40	0.48	0.50	1.19	1.47
4	0.30	0.42	0.51	0.81	1.62	1.99
5	0.41	0.49	0.55	1.22	2.11	2.53
6	0.54	0.60	0.62	1.76	2.72	3.15
7	0.60	0.63	0.64	2.36	3.35	3.79
8	0.68	0.68	0.72	3.04	4.03	4.51
media	0.38	0.50	0.56			
CV (%)	52	22	15			

La posición topográfica y geomorfológica de este punto no excluye un funcionamiento tipo descarga, ya que en zonas de poco relieve y medios porosos poco permeables es frecuente la adaptación de las capas freáticas a la superficie topográfica (Berga et al., 1987).

El segundo grupo es representativo de áreas de recarga, donde predomina el flujo descendente de agua y donde, por lo tanto, se produce un lavado de sales más o menos

acusado dependiendo de las características climáticas y geomorfológicas. Debe esperarse que estas áreas correspondan a zonas topográficamente elevadas y/o con conductividades hidráulicas no limitantes, como es el caso de las plataformas de Monegros II. A este segundo grupo pertenecen en efecto los puntos W2, W7 y W8, situados en plataformas (Tabla 18).

De estos resultados puede concluirse que, a pesar de que el sustrato geológico del área de estudio es muy variable y de que los materiales geológicos se presentan alternantes y con potencias frecuentemente menores de 50 cm, el método Wenner es razonablemente preciso para determinar los perfiles de recarga y de descarga, un aspecto de singular importancia para el control de las fuentes y sumideros de agua y sal en Monegros II.

Por otro lado, la evolución temporal de los perfiles de CE_e no permite establecer unas tendencias definidas, excepto quizá en el punto W8. De cualquier forma, dichas tendencias no eran de esperar, ya que no se han producido modificaciones en los puntos de medida, salvo en W3 y W4. Dichos puntos se encuentran situados en parcelas regadas en la actualidad, si bien el riego en el punto W4 comenzó en 1987 mientras que en la parcela en la que está situado el punto W3 el riego comenzó en el primer trimestre de 1989. En las lecturas realizadas en el área con el sensor electromagnético (apartado 3.4) en los dos metros superiores, se han apreciado asimismo diferencias en la CE_e en dos zonas en las que se sitúan los puntos W3 (zona norte) y W4 (zona sur). Es asimismo interesante resaltar que los valores obtenidos por el método Wenner en los puntos W3 y W4 y del SEM en los puntos 53 y 4 son bastante parecidos (Tabla 42).

Tabla 42. Valores de CE_e del primer metro de suelo obtenidos para los mismos puntos por el SEM (puntos 53 y 4) y por la configuración Wenner (puntos W3 y W4).

Punto	SEM		Wenner	
	CE_e (dS/m)			
	Mayo 88	Julio 89	Abril 88	Julio 89
53/W3	1.59	1.47	1.83	1.53
4/W4	0.34	0.21	0.36	0.35

Finalmente, debe resaltarse que la influencia de la textura y profundidad del suelo sobre las lecturas Wenner del primer metro no parece importante, ya que aunque en algunos suelos esqueléticos se han dado los valores mínimos de CE_e (W-7), en otros puntos situados en este mismo tipo de suelo se presentan valores de CE_e semejantes a los obtenidos en suelos más profundos y texturas más finas.

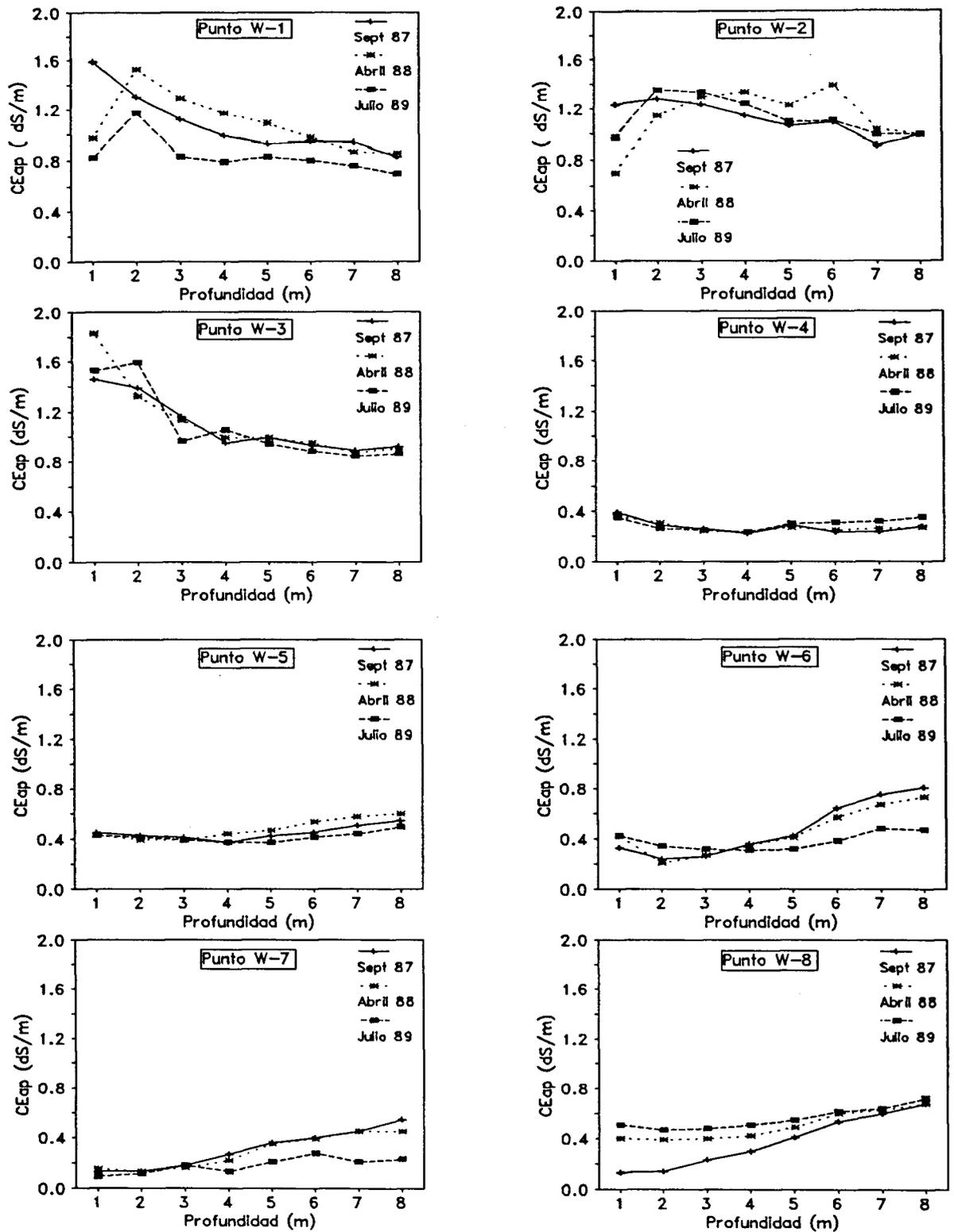


Figura 40. Prospección geoelectrica Wenner: perfiles de CE aparente (CE_a , dS/m) de los puntos W-1, W-2, W-3, W-4, W-5, W-6, W-7 y W-8 en diferentes fechas de muestreo.

Sondeos

En estos puntos existe información más detallada, ya que los datos obtenidos con la configuración Wenner pueden relacionarse con la posición y naturaleza de los materiales litológicos y con la profundidad de las zonas saturadas. Las Tablas 43 a 45 resumen los datos obtenidos en las diversas campañas de muestreo entre Junio 87 y Junio 89. Puede observarse que existen diferencias de los valores de CE_e entre puntos, pero las diferencias entre muestreos para un mismo punto no son importantes, salvo excepciones (S-10).

Los máximos de CE_e media del perfil los presentan los puntos S-1, S-9 y, en particular, S-10, todos ellos con valores superiores a 1 dS/m. Esos puntos se hallan situados en tres diferentes formaciones geológicas y tres diferentes tipos de suelo. Los mínimos de CE_e media del perfil los presentan los puntos S-4 y S-7, caracterizados por estar situados en el Mb. Bujaraloz y sobre suelos superficiales.

Los perfiles de " CE_e -profundidad" en que pueden subdividirse estos puntos son 1) perfil de recarga, 2) perfil de descarga y 3) perfil uniforme. Los dos primeros tipos de perfil fueron definidos anteriormente y el perfil uniforme se caracteriza porque su CE_e varía relativamente poco o no tiene una tendencia definida o saltos bruscos de variación con la profundidad.

Los puntos con perfil de recarga (S-5, S-8 y S-10) tienen en común la posición geomorfológica de plataforma (S-8 y S-10) o a media ladera (S-5). En las zonas de plataforma, la dirección del flujo tiene una componente vertical descendente que posibilita el lavado de las sales y su transporte, tanto en los suelos como en los materiales litológicos y por ello los valores de CE_e son generalmente bajos. Esta situación se refleja bien en el sondeo 5 (CE_e entre 0.27 y 0.46 dS/m), en el que la variabilidad del perfil es poco acusada y está favorecida por la posición profunda de la capa freática.

Los puntos con perfil uniforme (S-3 en dos fechas de muestreo y S-4) están situados también en posición de plataforma y en tipos de suelo similar. Ambos puntos se caracterizan por presentar valores de CE_e medios inferiores a 0.50 dS/m. Las columnas litológicas de S-3 y S-4 son diferentes entre sí y ambas están constituidas por alternancias de distintos materiales litológicos en pequeñas potencias, pero mientras S-3 presenta oscilaciones de nivel freático de hasta 67 cm., en S-4 la variación máxima es de 6 cm.

La inexistencia de una tendencia definida de CE_e con la profundidad podría interpretarse como asociada a una columna litológica muy homogénea y/o sin oscilaciones del nivel freático. Esta explicación puede adaptarse a las características del punto S-4, mientras que para S-3 esta interpretación no resulta satisfactoria.

Los perfiles de CE_e -a presentan a determinadas profundidades variaciones que pueden ser interpretadas como debidas a presencia de una zona saturada con agua más o menos salina o a la existencia en la serie estratigráfica de materiales de diferentes conductividades. En algunos casos, los ascensos apreciados en el perfil coinciden con los niveles freáticos medidos (S-2, S-5 y S-10) o con los niveles saturados detectados en la perforación (S-2, S-4, S-5, S-7 y S-10).

En el sondeo 1 los niveles freáticos se han medido entre 5.8 y 8.34 m. Estas diferencias de nivel no responden a variaciones reales, sino a la limpieza con aire comprimido llevada a cabo el verano de 1989, que desbloqueó el sondeo taponado por los lodos de perforación. Al primer nivel le corresponde una litología constituida por una alternancia de lutitas, margas y yesos con espesores menores de 10 cm, y al segundo un nivel de yeso amorfo posiblemente karstificado.

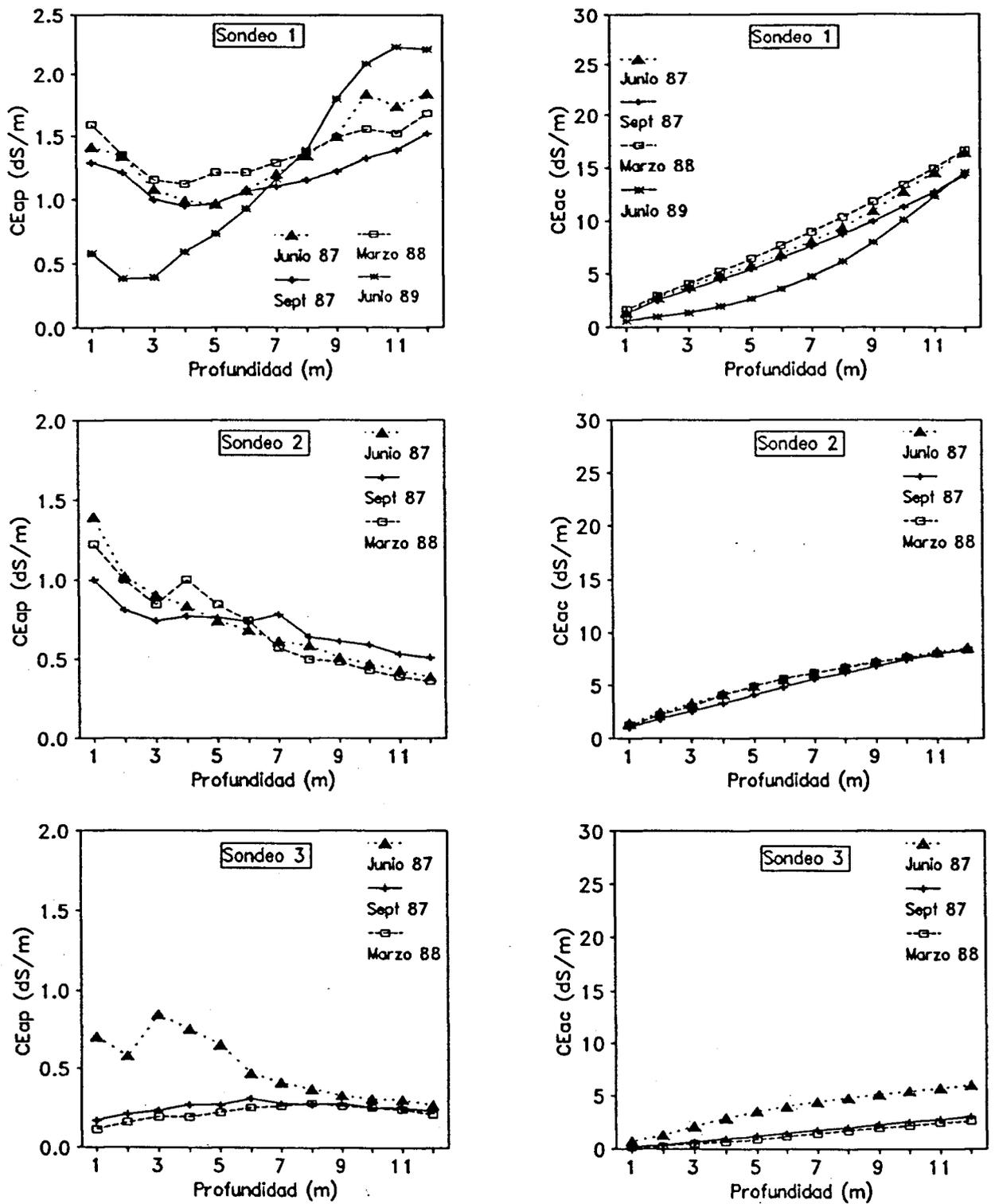


Figura 41. Prospección geoelectrica Wenner: perfiles de CE aparente (CE_{ap} , dS/m) y CE aparente acumulada (CE_{ac} , dS/m) de los sondeos 1, 2 y 3 en diferentes fechas de muestreo.

Tabla 43. Prospección geoelectrica Wenner. Valores de CE aparente y CE acumulada (CE_a y CE_{ac} , dS/m) de los sondeos 1, 2 y 3 para distintas profundidades y fechas de muestreo.

SONDEO N° 1 Prof. (m)	CE_a				CE_{ac}			
	Jun 87	Sept 87	Marz 88	Jun 89	Jun 87	Sept 87	Marz 88	Jun 89
1	1.41	1.29	1.59	0.58	1.41	1.29	1.59	0.57
2	1.34	1.21	1.35	0.38	2.75	2.50	2.94	0.94
3	1.08	1.00	1.15	0.39	3.83	3.50	4.10	1.33
4	0.99	0.95	1.12	0.59	4.82	4.45	5.22	1.92
5	0.97	0.97	1.21	0.73	5.79	5.42	6.43	2.66
6	1.07	1.06	1.21	0.93	6.85	6.48	7.64	3.59
7	1.20	1.10	1.29	1.16	8.05	7.58	8.93	4.75
8	1.35	1.15	1.37	1.39	9.40	8.73	10.30	6.14
9	1.50	1.22	1.49	1.80	10.90	9.95	11.79	7.95
10	1.84	1.33	1.56	2.09	12.74	11.28	13.35	10.04
11	1.74	1.39	1.52	2.23	14.49	12.67	14.87	12.27
12	1.84	1.52	1.68	2.21	16.33	14.19	16.55	14.48
media	1.36	1.18	1.38	1.21				
CV (%)	22	14	13	57				
SONDEO N°2 Prof. (m)	CE_a			CE_{ac}				
	Jun. 87	Sept. 87	Marz. 88	Jun. 87	Sept. 87	Marz. 88		
1	1.39	1.00	1.22	1.39	1.00	1.22		
2	1.02	0.81	1.00	2.41	1.81	2.22		
3	0.90	0.74	0.84	3.31	2.55	3.06		
4	0.83	0.77	1.00	4.14	3.32	4.06		
5	0.74	0.76	0.84	4.88	4.08	4.90		
6	0.68	0.73	0.74	5.56	4.81	5.64		
7	0.61	0.78	0.57	6.17	5.59	6.21		
8	0.59	0.64	0.50	6.76	6.23	6.71		
9	0.51	0.61	0.48	7.27	6.84	7.19		
10	0.47	0.59	0.43	7.74	7.43	7.62		
11	0.43	0.53	0.39	8.17	7.96	8.01		
12	0.39	0.51	0.36	8.56	8.47	8.37		
media	0.71	0.71	0.70					
CV (%)	39	19	39					
SONDEO N° 3 Prof. (m)	CE_a			CE_{ac}				
	Jun. 87	Sept. 87	Marz. 88	Jun. 87	Sept. 87	Marz. 88		
1	0.70	0.17	0.11	0.70	0.17	0.11		
2	0.58	0.21	0.16	1.28	0.38	0.27		
3	0.84	0.23	0.19	2.12	0.61	0.46		
4	0.75	0.27	0.19	2.87	0.88	0.65		
5	0.65	0.27	0.22	3.52	1.15	0.87		
6	0.47	0.31	0.25	3.99	1.46	1.12		
7	0.41	0.28	0.26	4.40	1.74	1.38		
8	0.37	0.27	0.28	4.77	2.01	1.66		
9	0.33	0.28	0.26	5.10	2.29	1.92		
10	0.31	0.25	0.25	5.42	2.54	2.17		
11	0.30	0.25	0.24	5.71	2.79	2.41		
12	0.27	0.23	0.21	5.98	3.02	2.62		
media	0.50	0.25	0.22					
CV (%)	38	14	22					

En la serie estratigráfica (Ficha de sondeo-Anexo 3) pueden constituir acuíferos los tres niveles de yesos carbonatizados (situados a profundidades de 3 m, 7 m y 8.4 m), y dos niveles de margas calcáreas muy fracturadas (entre 1.4 y 3 m y otro entre 10.2 y 11.3 m) que coinciden con incrementos de la CE_e (Figura 41.1) pero no con cambios de pendiente en la Figura 41.2. El nivel medido en el sondeo está influenciado por la existencia de varias zonas saturadas en el perfil. Algunas de las zonas saturadas han sido detectadas por el método 1 pero no por el método 2. Pese a ello, se observa en la Figura 41.2 que el descenso del nivel freático se ve reflejado en el desplazamiento del perfil de la CE_{ac} hacia valores inferiores.

La Figura 41.3 indica que el sondeo 2 tiene un perfil típico de descarga. Existen dos zonas (entre 3 y 4 m y a unos 7 m de profundidad) en las que la CE_e aumenta. A los 4 m comienza un nivel de yesos y entre 7 y 8 m hay una alternancia de yesos y lutitas. Sólo el nivel de yesos se ha considerado un nivel saturado en la perforación. Este nivel es muy poco potente y debido a ello no origina un cambio de pendiente importante en la Figura 41.4, pero sí se detecta su presencia en la Figura 41.3. Por otro lado, en la Figura 41.4 puede observarse que los perfiles de la CE acumulada son muy parecidos, tal como correspondería a cambios pequeños en el nivel del agua, aunque de nuevo se observa que el descenso del nivel freático va asociado a un ligero descenso de la CE_{ac} .

El sondeo 3 (Tabla 43) presenta perfiles de CE_e diferentes entre el muestreo de Junio-87 y los otros dos, ya que el primero presenta variaciones importantes en el perfil mientras que los segundos tienen un perfil de CE_e relativamente uniforme, lo que impide estimar los niveles freáticos a partir de las lecturas de CE_e . El nivel medido en los sondeos no corresponde a un único nivel acuífero, sino que representa las zonas saturadas ubicadas en niveles calcáreos situados a 3 m, 7.7 m y 9 m (datos de partes de perforación).

En este sondeo existen materiales con espesores superiores a 1 m, lo que permite calcular la CE_e correspondiente a esa profundidad por el método de Halvorson y Rhoades (1974). Este análisis permite concluir que las lutitas presentan valores de CE_e de 0.43 dS/m, varias veces superiores a las calizas (0.06 dS/m) y a los yesos (0.09 dS/m).

El nivel medido en el sondeo 4 (Figura 42.1 y 22.2) oscila entre 3.85 y 3.91 m. La columna litológica correspondiente a este punto muestra una alternancia de yesos y calizas, con predominio de estas últimas, lo que explica la poca variabilidad en los valores de la CE_e en el perfil, así como los bajos valores obtenidos (Tabla 44). La existencia de un incremento de CE_e a partir de los 3-4 m de profundidad según fechas de muestreo, coincide con la existencia de una zona saturada a dicha profundidad.

El sondeo 5 (Figura 42.3 y 42.4) presenta un perfil de CE_e típico de las zonas situadas a media pendiente, con importantes diferencias de CE_e entre fechas de muestreo que no se pueden justificar por las fluctuaciones irrelevantes sufridas por el nivel freático. A pesar de ello, puede apreciarse un aumento de la CE_e a los 9 m, profundidad a la que se detectó una zona saturada durante la perforación, si bien los niveles medidos posteriormente han estado siempre por debajo de dicha profundidad. Ningún material litológico se presenta en la serie con potencia suficiente (> 1 m) para correlacionarlo con medidas de CE_e . En la Figura 42.4 puede observarse que una diferencia de nivel freático de 8 cm produce un aumento de CE_{ac} próximo al 10 %, mientras que una subida de 11 cm produce un incremento de CE_{ac} del 70 %. La explicación incluye tanto los efectos de la variabilidad litológica como la influencia del período en que se han efectuado las medidas.

Tabla 44. Prospección geoelectrica Wenner. Valores de CE aparente y CE acumulada (CE_a y CE_{ac} , dS/m) de los sondeos 4, 5 y 7 para distintas profundidades y fechas de muestreo.

SONDEO N° 4 Prof. (m)	CE_a			CE_{ac}		
	Jun. 87	Sept. 87	Marz. 88	Jun. 87	Sept. 87	Marz. 88
1	0.16	0.06	0.14	0.16	0.06	0.14
2	0.14	0.04	0.13	0.29	0.10	0.27
3	0.12	0.04	0.11	0.41	0.14	0.38
4	0.11	0.06	0.10	0.52	0.20	0.48
5	0.12	0.07	0.10	0.64	0.27	0.58
6	0.12	0.09	0.11	0.76	0.36	0.69
7	0.13	0.12	0.12	0.89	0.48	0.81
8	0.14	0.14	0.14	1.03	0.62	0.95
9	0.15	0.18	0.15	1.18	0.80	1.10
10	0.16	0.21	0.18	1.33	1.01	1.28
11	0.15	0.22	0.17	1.48	1.23	1.45
12	0.17	0.22	0.18	1.65	1.45	1.63
media	0.14	0.12	0.14			
CV (%)	13	56	21			
SONDEO N° 5 Prof. (m)	CE_a			CE_{ac}		
	Jun. 87	Sept. 87	Marz. 88	Jun. 87	Sept. 87	Marz. 88
1	0.53	0.17	0.17	0.53	0.17	0.17
2	0.58	0.14	0.16	1.11	0.31	0.33
3	0.52	0.16	0.19	1.63	0.47	0.52
4	0.45	0.23	0.24	2.08	0.70	0.76
5	0.44	0.28	0.29	2.52	0.98	1.05
6	0.41	0.31	0.33	2.93	1.29	1.38
7	0.39	0.32	0.36	3.32	1.61	1.74
8	0.37	0.34	0.36	3.69	1.95	2.10
9	0.47	0.34	0.35	4.16	2.29	2.45
10	0.46	0.33	0.35	4.62	2.62	2.80
11	0.50	0.31	0.35	5.12	2.93	3.15
12	0.43	0.31	0.35	5.55	3.24	3.50
media	0.46	0.27	0.29			
CV (%)	13	26	26			
SONDEO N° 7 Prof. (m)	CE_a			CE_{ac}		
	Jun. 87	Sept. 87	Marz. 88	Jun. 87	Sept. 87	Marz. 88
1	0.25	0.28	0.35	0.25	0.28	0.35
2	0.14	0.14	0.22	0.39	0.42	0.57
3	0.13	0.10	0.17	0.51	0.52	0.74
4	0.14	0.10	0.15	0.65	0.62	0.89
5	0.14	0.11	0.13	0.79	0.73	1.02
6	0.12	0.13	0.12	0.91	0.86	1.14
7	0.12	0.14	0.13	1.13	1.00	1.27
8	0.14	0.13	0.13	1.27	1.13	1.40
9	0.16	0.13	0.13	1.43	1.26	1.53
10	0.12	0.12	0.12	1.55	1.38	1.65
11	0.11	0.11	0.11	1.66	1.49	1.76
12	0.14	0.11	0.12	1.80	1.60	1.88
media	0.14	0.13	0.16			
CV (%)	24	35	41			

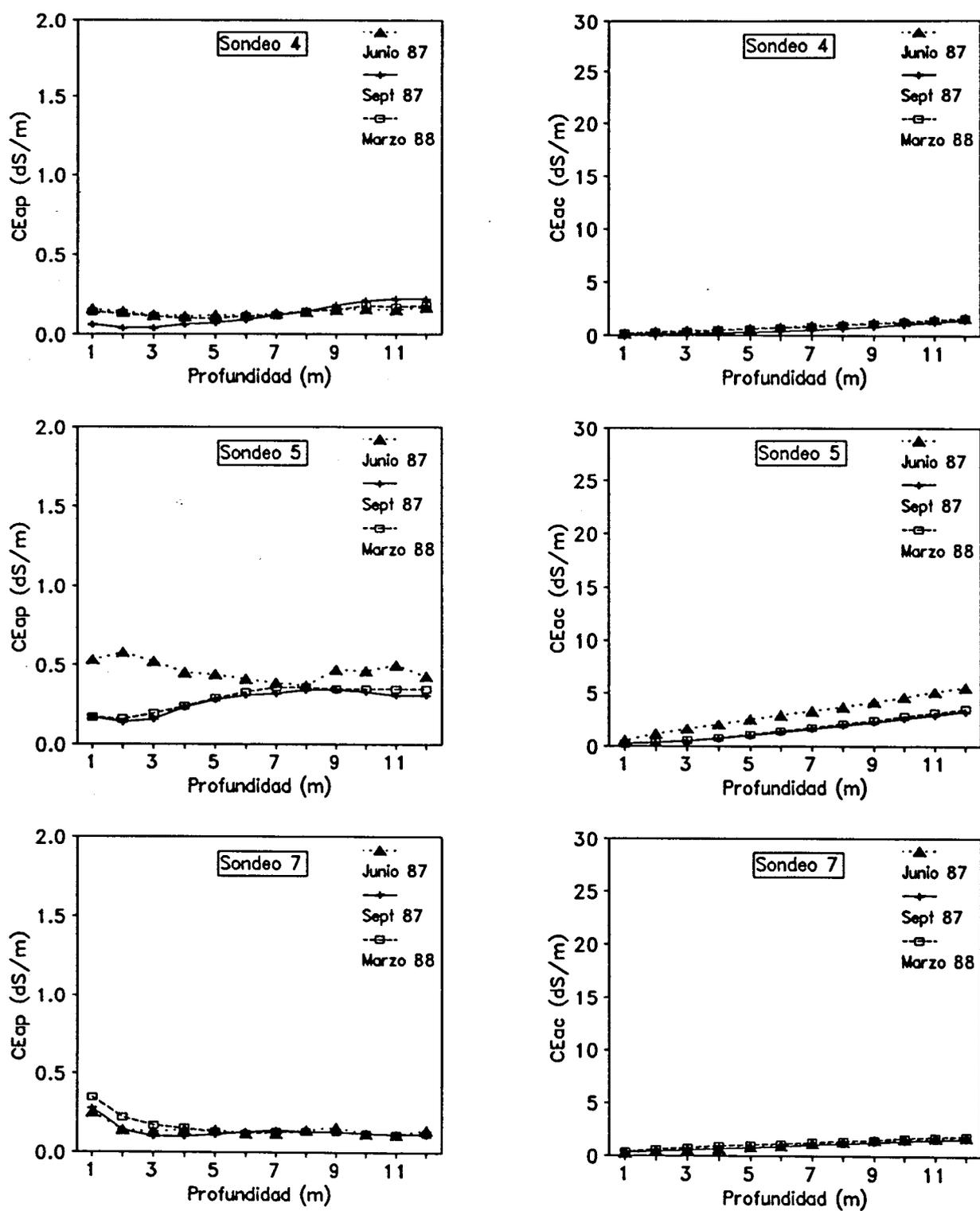


Figura 42. Prospección geoelectrica Wenner: perfiles de CE aparente (CE_{ap} , dS/m) y CE aparente acumulada (CE_{ac} , dS/m) de los sondeos 4, 5 y 7 en diferentes fechas de muestreo.

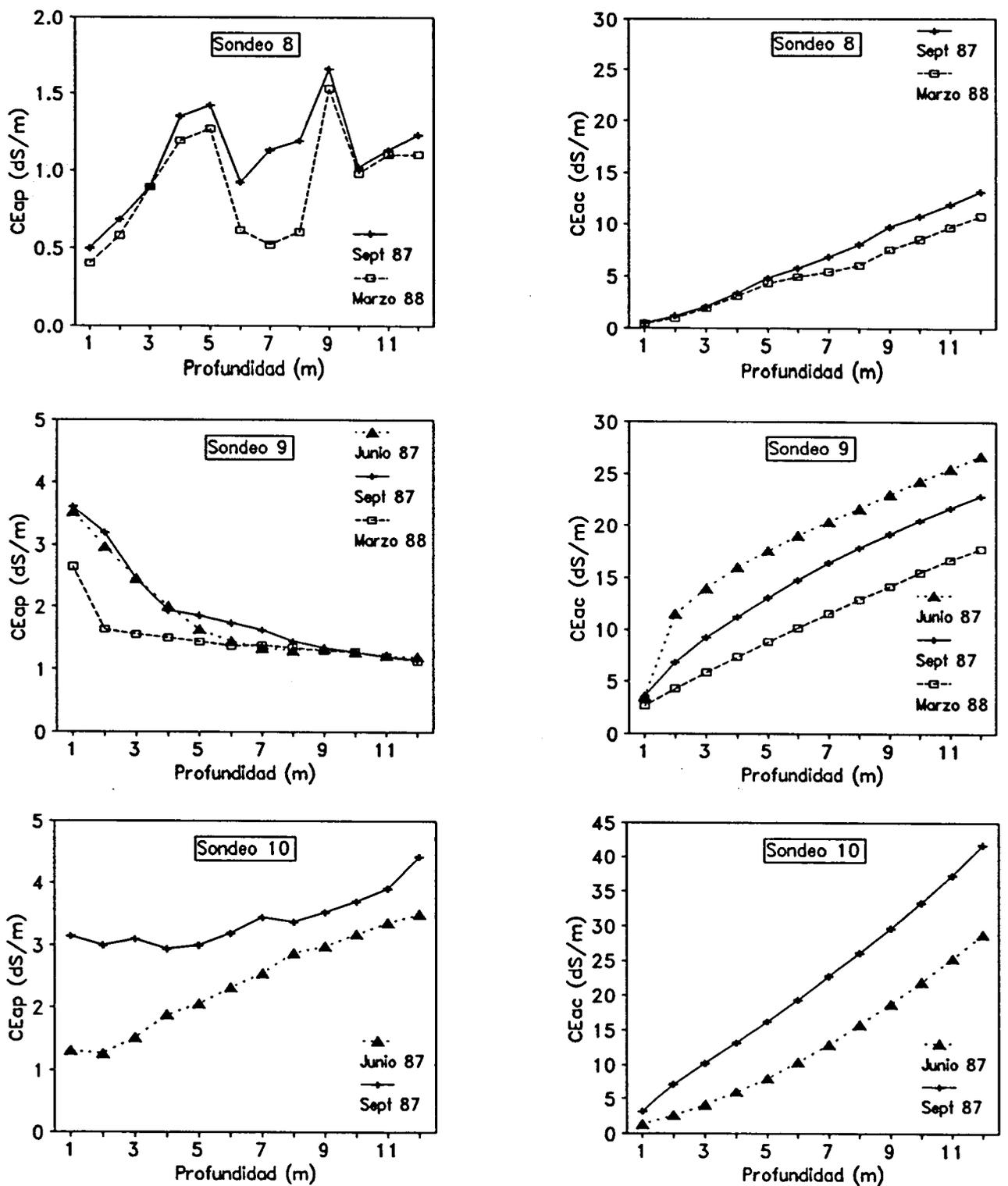


Figura 43. Prospección geoelectrica Wenner: Perfiles de CE aparente (CE_a , dS/m) y CE aparente acumulada (CE_{ac} , dS/m) de los pozos 8, 9 y 10 en diferentes fechas de muestreo.

En la columna litológica se aprecia la existencia de numerosos niveles capaces de contener y transmitir agua. Por otro lado, durante la primavera siempre se detectan los niveles máximos debido a que en esta época puede haber infiltración efectiva y el contenido de agua puede ser mayor en el perfil del suelo y sustrato.

El sondeo 7 (Figura 42.5 y 42.6) presenta comportamientos ligeramente diferentes en las distintas fechas de medida. En Jun-87 se detecta un incremento importante de la CE_e a unos 8-10 m de profundidad, zona donde se detectó durante la perforación un nivel acuífero carbonatado (poroso por fracturación y disolución). Los niveles medidos corresponden fundamentalmente a este nivel saturado que se encuentra bajo presión. Los datos de CE_e obtenidos junto al sondeo 8 se presentan en la Tabla 45. En la Figura 43.2 puede observarse la existencia de cambios de pendiente en ambas líneas que son coincidentes en las profundidades a que se producen. Entre 4 y 5 m existe un incremento de CE_e común a ambas fechas de muestreo, que se corresponde con un cambio de pendiente a 5 m en la Figura 43.2. A 9 m, vuelve a producirse un nuevo incremento, muy importante en una de las medidas, que se corresponde con un cambio de pendiente en la Figura 43.2 situado a 8 m. En el metro 11 también se detecta un incremento (no común a todos los muestreos) no coincidente con un importante cambio de pendiente en la Figura 43.2. Los datos de CE_e y CE_{ec} obtenidos en las tres fechas de medida del sondeo 9 se presentan en la Tabla 45. Los niveles medidos en el sondeo presentan ligeras variaciones. La CE_e de los primeros horizontes es mayor que en profundidad. No pueden hacerse correlaciones entre la litología y la CE_e debido al pequeño espesor de los materiales en la columna litológica. Los cambios de CE_e no se corresponden con los niveles freáticos medidos.

Finalmente, en el sondeo 10 (Figuras 43.5 y 43.6) los niveles freáticos medidos corresponden a un nivel de calizas arenosas detectado en la perforación entre 2 y 3.5 m. En la Figura 43.5 se puede apreciar un ascenso de la CE_e a partir del metro 2, y un ascenso puntual en los metros 7 y 8 que corresponden a otra zona saturada calcárea detectada en profundidad. El perfil corresponde a una zona de recarga. La Figura 43.6 sólo detecta un cambio de pendiente en el metro 2 ya que en profundidad tienen mayor influencia los cambios de litología que la diferenciación entre zona saturada y no saturada.

Tal como ocurría con los puntos de medida ubicados en los sectores I y II, los perfiles de CE_e para cada sondeo se mantienen en el tiempo y permiten asociar un determinado perfil (Descarga D, Recarga R, o Uniforme U) a una posición geomorfológica (plataforma o depresión) a la que va ligado un comportamiento hidrodinámico típico de recarga o descarga. Los sondeos 1, 2, 7, y 9 presentan un perfil CE_e de descarga, la posición geomorfológica de S2 y S9 es una depresión y la de S1 y S7 es de plataforma. Las diferencias entre los valores estimados (en las Figuras) y medidos oscilan entre 1 y 2 m (excepto S2 en Junio 87 y S1 en todas las fechas). En estos puntos la salinidad media del perfil es poco variable en el tiempo, lo que se corresponde con su ubicación con zonas de descarga. Sin embargo, no se manifiesta la previsible homogeneidad en valores de CE_e a partir de la posición del nivel freático (zona saturada); por tanto, debe considerarse que no todos los materiales por debajo del nivel freático medido se hallan saturados, sino que existen una o varias zonas saturadas en el perfil litológico intercaladas entre materiales no saturados.

Los sondeos 3, 4, 5, 8, y 10 presentan perfiles de recarga o uniformes. Todos ellos se sitúan en posiciones topográficas elevadas, la salinidad (CE_e) en el perfil es bastante elevada en S8, S9 y S10, debido a los elevados valores de CE_e en el primer metro, que son consecuencia de la existencia en estos puntos de suelos más profundos (Tabla 19).

Tabla 45. Prospección geoelectrica Wenner. Valores de CE aparente y CE acumulada (CE_a y CE_{ac}, dS/m) de los sondeos 8, 9 y 10 para distintas profundidades y fechas de muestreo.

SONDEO N°8 Prof. (m)	CE _a		CE _{ac}			
	Sept. 87	Marz. 88	Sept. 87	Marz. 88		
1	0.50	0.40	0.50	0.40		
2	0.68	0.58	1.18	0.98		
3	0.89	0.89	2.05	1.87		
4	1.35	1.19	3.42	3.07		
5	1.42	1.27	4.84	4.34		
6	0.92	0.61	5.76	4.95		
7	1.13	0.52	6.89	5.47		
8	1.19	0.60	8.08	6.07		
9	1.66	1.53	9.74	7.60		
10	1.02	0.98	10.76	8.58		
11	1.13	1.10	11.89	9.68		
12	1.23	1.10	13.12	10.78		
media	1.09	0.90				
CV (%)	28	38				
SONDEO N° 9 Prof. (m)	CE _a			CE _{ac}		
	Jun. 87	Sept. 87	Marz. 88	Jun. 87	Sept. 87	Marz. 88
1	3.53	3.61	2.64	3.53	3.61	2.64
2	7.96	3.19	1.64	11.49	6.80	4.28
3	2.45	2.44	1.56	13.94	9.24	5.84
4	2.00	1.94	1.50	15.94	11.18	7.34
5	1.64	1.86	1.44	17.58	13.04	8.78
6	1.45	1.74	1.37	19.03	14.78	10.15
7	1.34	1.63	1.38	20.37	16.41	11.53
8	1.30	1.45	1.35	21.67	17.86	12.88
9	1.33	1.35	1.29	23.00	19.21	14.17
10	1.27	1.27	1.28	24.27	20.48	15.45
11	1.22	1.20	1.20	25.49	21.68	16.65
12	1.20	1.15	1.13	26.69	22.83	17.78
media	1.81	1.90	1.48			
CV (%)	41	40	25			
SONDEO N° 10 Prof. (cm)	CE _a		CE _{ac}			
	Jun. 87	Sept. 87	Jun. 87	Sept. 87		
1	1.31	3.14	1.31	3.14		
2	1.26	3.00	2.57	7.14		
3	1.52	3.10	4.09	10.24		
4	1.88	2.94	5.97	13.18		
5	2.06	3.00	8.03	16.18		
6	2.32	3.19	10.35	19.37		
7	2.55	3.44	12.90	22.81		
8	2.88	3.37	15.78	26.18		
9	2.99	3.53	18.77	29.71		
10	3.18	3.70	21.95	33.41		
11	3.36	3.91	25.31	37.32		
12	3.50	4.42	28.81	41.74		
media	2.40	3.40				
CV (%)	32	12				

Pozos

La aplicación del método Wenner junto a los pozos tiene como objetivo obtener información directa de la profundidad del nivel freático contrastable con la prospección geoelectrica realizada.

Las Tablas 46 y 47 presentan las CE_s y CE_{sc} obtenidas junto a seis pozos en diferentes fechas de muestreo. La máxima profundidad investigada ha sido en todos los casos de 12 m.

Los perfiles de todos los puntos, excepto el situado en una plataforma (pozo 17), presentan un perfil típico de zona de descarga, esto es, descenso de la CE_s con la profundidad (Figuras 44 y 45). Ello coincide con la posición geomorfológica de val o depresión en la que se localizan (Tabla 20), con la excepción del pozo 24, que tiene un perfil invertido a pesar de estar en una plataforma.

Esta excepción puede explicarse porque dentro de la amplia plataforma que constituyen los terrenos al sur de Bujaraloz, existen zonas deprimidas que constituyen puntos locales de descarga en los que el efecto de la capa freática sobre la CE_s es similar al de las grandes depresiones y vales. Asimismo, en la plataforma al sur de Bujaraloz, las capas freáticas se presentan adaptadas a la superficie topográfica (Berga et al., 1987) y se encuentran relativamente próximas a la superficie del suelo tanto en las zonas deprimidas como en las elevadas.

Parece lógico pensar que con el ascenso de nivel y con el incremento de la CE del agua debería incrementarse la CE_s media. Es interesante señalar que con el descenso del nivel freático desciende la CE_s media del perfil, mientras que no existe una relación definida entre la CE del agua subterránea y el valor medio de CE_s en el perfil. Esto último no es sorprendente, ya que las variaciones de la CE del agua en pozos de estas características están muy afectadas por factores ajenos a la variación del nivel de agua en el acuífero.

Los niveles de agua del pozo 13 medidos en Mayo y Septiembre de 1987 presentan una oscilación relativa de 70 cm. Sin embargo, no se detecta ningún incremento relativo importante de la CE_s a estas profundidades. Los cambios de pendiente (Figura 44.2), a 2 y 4 m en Mayo 87 y entre 6 y 7 m en Septiembre 87, pueden ir asociados a la presencia de niveles saturados colgados, hecho que se ha evidenciado en el análisis conjunto de las columnas de sondeos-partes de perforación y se detallará en el Capítulo 6. El tipo de perfil de este pozo es de zona de descarga en Mayo de 1987 y perfil uniforme a partir de 3 m en Septiembre de 1987.

El pozo 17, diferenciable del resto, presenta un perfil en el que la CE aumenta en

profundidad hasta los 3-5 m (según fechas de muestreo) y se estabiliza por debajo de esta (Figura 44.3), por lo que su entorno se puede asociar a un área de recarga. El perfil de área de recarga se mantiene durante todos los muestreos. La Figura 44.4 permite diferenciar varios cambios en la pendiente de la relación CE_e acumulada (CE_{ec}) frente a la profundidad, aunque ninguno de ellos puede asociarse con el nivel freático de referencia en el pozo.

El pozo 24 presenta un perfil de CE_e típico de áreas de descarga. La profundidad del agua varió entre 7.73 m y 8.07 m. Los cambios de pendiente de la CE_{ec} se producen a los 2-3 m y a los 8-9 m, lo que podría indicar la presencia de un nivel freático superficial y otro más profundo, este último más o menos coincidente con el nivel del agua en el pozo. A pesar de la existencia de varios niveles saturados, apreciables de visu en las paredes del pozo, no ha sido posible correlacionar los mismos con las variaciones de conductividad.

El pozo 43 (Figuras 45.1 y 45.2) está situado en la parte central de una amplia val. Pueden observarse los bajos valores de CE_e para el conjunto de los materiales y el descenso sistemático de la CE con la profundidad (área de descarga).

El pozo 54 (Fig. 45.3 y 45.4) presenta un perfil de área de descarga en todos los períodos de medida. A partir de los 4 m se observa un ascenso continuado de la CE_e , lo que puede asociarse a la existencia de una zona saturada a ese nivel.

Por último, el pozo 118 (Fig 45.5 y 45.6) se sitúa en una val dentro de la amplia plataforma definida al sur de Bujaraloz. La CE_e del suelo presenta valores más altos que el resto (Tabla 46). A partir de los cuatro metros, profundidad a la que se ha medido el nivel piezométrico, la CE_e se estabiliza o incluso aumenta ligeramente en dos de las fechas de muestreo.

En síntesis, de los resultados presentados hasta aquí en este apartado de prospección geoelectrica Wenner puede concluirse que los perfiles de CE_e tipo descarga (la CE desciende con la profundidad) coinciden en un 96% de los casos analizados con las posiciones geomorfológicas susceptibles de inducir dicha descarga (zonas deprimidas con aguas subterráneas superficiales). Esta observación es relevante ya que, desde el punto de vista agrícola, la identificación temprana de las zonas de descarga es importante al objeto de establecer medidas correctoras previas a la salinización de la zona de raíces de los cultivos. La coincidencia en el caso de perfiles tipo recarga (la CE aumenta con la profundidad) y las correspondientes posiciones geomorfológicas se produce únicamente en el 44% de las observaciones realizadas, aunque las discrepancias pueden explicarse en algunos casos por la existencia de zonas de descarga en posiciones que, desde el punto de vista estrictamente geomorfológico, se presumían de recarga.

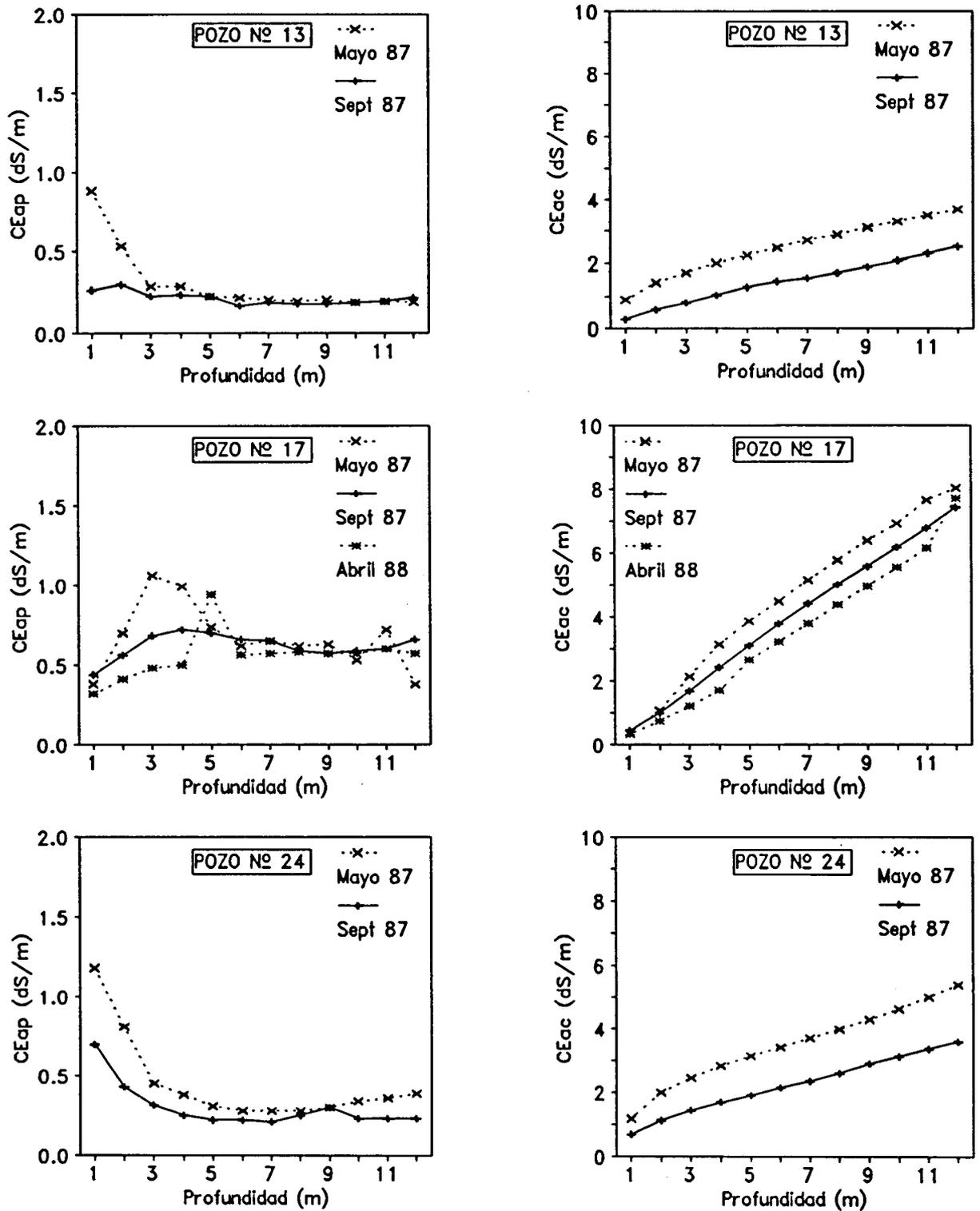


Figura 44. Prospección geoelectrica Wenner: Perfiles de CE aparente (CE_{ap} , dS/m) y CE aparente acumulada (CE_{ac} , dS/m) de los pozos 13, 17 y 24 en diferentes fechas de muestreo.

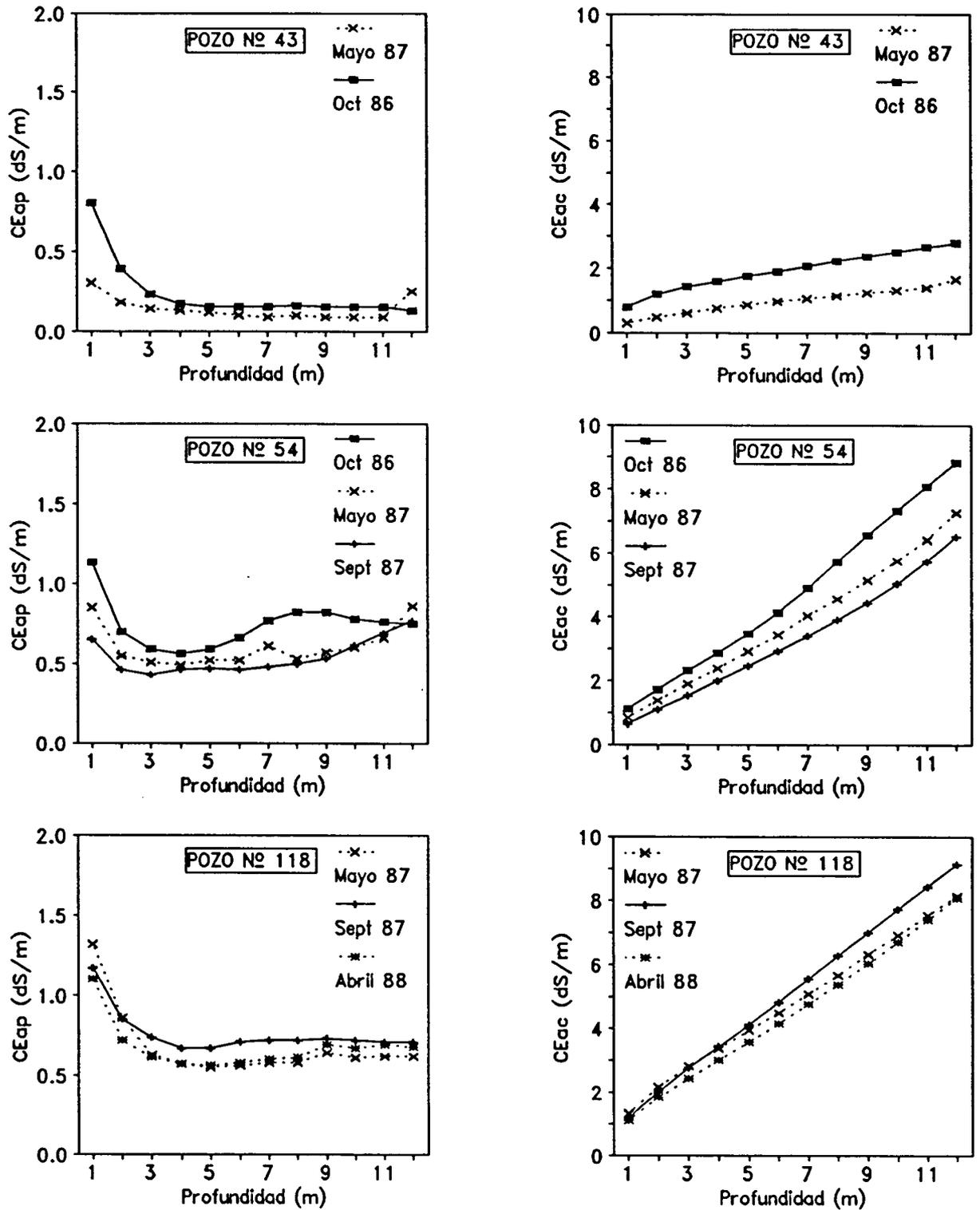


Figura 45. Prospección geoelectrica Wenner: Perfiles de CE aparente (CE_a , dS/m) y CE aparente acumulada (CE_{ac} , dS/m) de los pozos 43, 54 y 118 en diferentes fechas de muestreo.

Tabla 46. Prospección geoelectrica Wenner. Valores de CE aparente y CE acumulada (CE_a y CE_{ac}, dS/m) de los pozos 13, 17 y 24 para distintas profundidades y fechas de muestreo.

CE = 2.70		CE _a		CE _{ac}	
POZO N° 13	Mayo 87	Sept. 87	Mayo 87	Sept. 87	
Prof. (m)	NF=6.44	NF=7.14	NF=6.44	NF=7.14	
1	0.88	0.27	0.88	0.27	
2	0.53	0.30	1.41	0.57	
3	0.29	0.23	1.70	0.80	
4	0.29	0.24	2.00	1.04	
5	0.23	0.23	2.23	1.27	
6	0.22	0.17	2.45	1.44	
7	0.21	0.19	2.67	1.53	
8	0.20	0.18	2.87	1.71	
9	0.21	0.18	3.08	1.89	
10	0.19	0.19	3.28	2.08	
11	0.20	0.20	3.48	2.28	
12	0.19	0.22	3.67	2.50	
media	0.30	0.22			
CV (%)	65	18			

CE = 5.98		CE _a			CE _{ac}		
POZO N° 17	Mayo 87	Sept. 87	Abr. 88	Mayo 87	Sept. 87	Abr. 88	
1	0.38	0.44	0.32	0.38	0.44	0.32	
2	0.70	0.56	0.41	1.08	1.00	0.73	
3	1.06	0.68	0.48	2.15	1.68	1.21	
4	0.99	0.72	0.50	3.14	2.41	1.71	
5	0.74	0.70	0.94	3.88	3.12	2.66	
6	0.62	0.66	0.56	4.50	3.78	3.22	
7	0.65	0.65	0.57	5.15	4.43	3.79	
8	0.62	0.59	0.58	5.77	5.01	4.38	
9	0.63	0.57	0.57	6.40	5.58	4.96	
10	0.53	0.59	0.57	6.93	6.17	5.53	
11	0.72	0.60	0.60	7.65	6.78	6.14	
12	0.38	0.66	0.57	8.03	7.44	7.71	
media	0.67	0.62	0.56				
CV (%)	29	12	25				

CE = 10.72		CE _a		CE _{ac}	
POZO N° 24	Mayo 87	Sept. 87	Mayo 87	Sept. 87	
Prof. (m)	NF=7.72	NF=8.07	NF=7.72	NF=8.07	
1	1.18	0.70	1.18	0.69	
2	0.81	0.43	1.99	1.13	
3	0.45	0.31	2.45	1.44	
4	0.38	0.25	2.83	1.69	
5	0.31	0.22	3.15	1.91	
6	0.28	0.22	3.43	2.14	
7	0.28	0.21	3.72	2.35	
8	0.28	0.25	3.99	2.60	
9	0.30	0.30	4.29	2.91	
10	0.34	0.23	4.63	3.13	
11	0.36	0.23	4.99	3.37	
12	0.39	0.23	5.39	3.60	
media	0.45	0.30			
CV (%)	59	45			

Tabla 47. Prospección geoelectrica Wenner. Valores de CE aparente y CE acumulada (CE_a y CE_{ac}, dS/m) de los pozos 43, 54 y 118 para distintas profundidades y fechas de muestreo.

CE = 3.14		CE_a		CE_{ac}			
POZO N° 43	Mayo 87	Oct. 86	Mayo 87	Oct. 86			
Prof. (m)	NF=3.39	NF=3.05	NF=3.39	NF=3.05			
1	0.30	0.80	0.30	0.80			
2	0.18	0.39	0.48	1.20			
3	0.14	0.23	0.62	1.44			
4	0.13	0.17	0.76	1.60			
5	0.12	0.15	0.87	1.76			
6	0.10	0.15	0.97	1.91			
7	0.09	0.15	1.07	2.07			
8	0.10	0.16	1.16	2.23			
9	0.09	0.15	1.25	2.38			
10	0.09	0.15	1.33	2.53			
11	0.09	0.15	1.42	2.68			
12	0.25	0.13	1.67	2.81			
media	0.14	0.23					
CV (%)	47	80					
CE = 6.05		CE_a			CE_{ac}		
POZO N° 54	Oct. 86	Mayo 87	Sept. 87	Oct. 86	Mayo 87	Sept. 87	
Prof. (m)	NF=3.78	NF=4.03	NF=4.27	NF=3.78	NF=4.03	NF=4.27	
1	1.13	0.85	0.65	1.13	0.85	0.65	
2	0.70	0.55	0.46	1.73	1.40	1.11	
3	0.59	0.51	0.43	2.32	1.91	1.54	
4	0.56	0.49	0.46	2.88	2.40	2.00	
5	0.59	0.52	0.47	3.47	2.92	2.47	
6	0.66	0.52	0.46	4.13	3.44	2.93	
7	0.77	0.61	0.48	4.90	4.05	3.41	
8	0.82	0.53	0.50	5.72	4.58	3.91	
9	0.82	0.57	0.53	6.54	5.15	4.44	
10	0.78	0.60	0.61	7.32	5.75	5.05	
11	0.76	0.66	0.69	8.08	6.41	5.74	
12	0.75	0.86	0.77	8.83	7.27	6.51	
media	0.74	0.61	0.54				
CV (%)	20	20	20				
CE = 2.72		CE_a			CE_{ac}		
POZO N° 118	Mayo 87	Sept. 87	Abr. 88	Mayo 87	Sept. 87	Abr. 88	
Prof. (m)	NF=3.65	NF=3.61	NF=4.08	NF=3.65	NF=3.61	NF=4.08	
1	1.32	1.17	1.10	1.32	1.17	1.10	
2	0.86	0.85	0.72	2.18	2.02	1.83	
3	0.63	0.74	0.61	2.82	2.76	2.44	
4	0.57	0.67	0.57	3.39	3.44	3.01	
5	0.55	0.67	0.56	3.95	4.12	3.58	
6	0.56	0.71	0.58	4.50	4.83	4.16	
7	0.58	0.72	0.60	5.08	5.55	4.77	
8	0.58	0.72	0.61	5.67	6.28	5.38	
9	0.64	0.73	0.69	6.32	7.00	6.04	
10	0.61	0.72	0.67	6.93	7.72	6.71	
11	0.62	0.71	0.69	7.55	8.44	7.40	
12	0.62	0.71	0.68	8.15	9.15	8.08	
media	0.68	0.76	0.67				
CV (%)	31	17	21				

Estimación de los niveles freáticos

Desde el punto de vista hidrogeológico, la configuración Wenner se ha utilizado para detectar capas freáticas, que se expresan como la parte superior de un horizonte relativamente conductor de la electricidad, siempre que las condiciones subsuperficiales sean relativamente homogéneas (Bouwer, 1978). Evidentemente, esta última condición de homogeneidad no se cumple en la zona de Monegros II, razón por la cual no son de esperar a priori resultados muy favorables. Así, los resultados presentados en pozos y sondeos indican buenas correlaciones entre niveles freáticos medidos y estimados en algunas ocasiones, y pobres en otras ocasiones.

En este apartado se ha efectuado una síntesis de resultados al objeto de establecer las ventajas y limitaciones del método y las situaciones en que es posible su aplicación predictiva. En la Tabla 48 se presentan los datos de nivel medidos en los pozos y sondeos (éstos últimos identificados con una **S** antes del número respectivo), las fechas de muestreo, el tipo de perfil (Descarga, Recarga, Uniforme), la profundidad del agua medida y la estimada según los criterios expuestos con anterioridad. La Figura 46 presenta la relación entre los niveles freáticos medidos y estimados, en la que se han dibujado las líneas de ± 1 metro de desviación respecto a la bisectriz 1:1. La regresión lineal entre estas dos variables tiene un coeficiente de correlación $r = 0.43$, significativo al 1%, pero que, en cualquier caso, produce unos elevados errores estándar de estimación (e.s.e. = 1.8 m).

De la Figura 46 puede deducirse que, en general, el método Wenner tiende a subestimar la profundidad del nivel freático, posiblemente debido a que la existencia de horizontes superficiales de baja resistividad reduce la profundidad efectiva de penetración eléctrica. Esta observación es relevante, ya que indica que con dicho método es difícil que se produzcan errores de predicción donde el nivel freático se esté sobrestimando, lo cual sería mucho más grave que el error de subestimación antes mencionado. Asimismo, puede observarse en esta Figura que los puntos con perfil tipo descarga están en general más próximos a la línea 1:1 que los del tipo recarga o uniforme. La correlación entre los niveles medidos y estimados para los puntos con perfil tipo descarga ($r = 0.75$) es sensiblemente mejor que la del conjunto de puntos y el error estándar de la estimación es de 0.54 m.

La Tabla 49 presenta el porcentaje de puntos con valores estimados dentro de distintos márgenes de fiabilidad (1, 1.5 y 2.0 m) para cada tipo de perfil caracterizado. El perfil de descarga presenta más del 50 % de los puntos dentro del margen de fiabilidad de ± 1 m, y este porcentaje aumenta hasta el 75% cuando el margen es de ± 2 m. Para los perfiles uniforme y de recarga estos porcentajes son, en todos los casos, inferiores.

El hecho de que las predicciones sean más fiables en los perfiles tipo descarga puede deberse a que la zona saturada está generalmente mejor definida que en los otros perfiles, aunque la presencia de estratos lutíticos puede hacer que la franja capilar aumente considerablemente. En las zonas de recarga la existencia de más de un nivel saturado en profundidad o la existencia de niveles colgados, cuyo espesor no puede ser detectado por el método Wenner, tiene un mayor efecto que en los perfiles de descarga, ya que el nivel medido en un determinado momento puede ser la suma de todos los niveles atravesados por el pozo o sondeo o estar situado por encima de la zona saturada (niveles confinados). Finalmente, este método no es capaz de detectar más que los acuíferos más potentes o cuando las diferencias de resistividad de los materiales saturados y el resto de los materiales litológicos son importantes.

Tabla 48. Estimación de niveles freáticos. Tipo de perfil (D = descarga, U = uniforme, R = recarga), nivel medido y estimado para cada punto y fecha de muestreo.

PUNTO DE MUESTREO	FECHA	TIPO DE PERFIL	NIVEL MEDIDO (m)	NIVEL ESTIMADO (m)
13	Ma 87	D	6.4	3.0
	Se 87	U	7.1	3.0
17	Ma 87	R	6.0	6.0
	Se 87	R	6.3	4.0
	Ab 88	R	6.3	4.0
24	Ma 87	D	7.7	8.0
	Se 87	D	8.1	7.0
43	Ma 87	D	3.4	3.0
	Oc 86	D	3.1	5.0
54	Oc 86	D	3.8	4.0
	Ma 87	D	4.0	4.0
	Se 87	D	4.3	3.0
118	Ma 87	D	3.7	5.0
	Se 87	D	3.6	4.0
	Ab 88	D	4.1	4.0
S1	Ju 87	R	6.0	5.0
	Se 87	R	6.1	4.0
	Ma 88	R	5.8	4.0
S2	Ju 87	D	3.1	7.0
	Se 87	D	3.5	3.0
	Ma 88	D	3.3	3.0
S3	Ju 87	R	8.7	11.0
	Se 87	U	8.9	5.0
	Ma 88	U	9.3	4.0
S4	Ju 87	U	3.9	4.0
	Se 87	U	3.9	3.0
	Ma 88	U	3.9	5.0
S5	Ju 87	D	10.1	10.0
	Se 87	R	10.4	7.0
	Ma 88	R	10.3	7.0
S7	Ju 87	D	4.9	4.0
	Se 87	D	5.1	5.0
	Ma 88	D	5.0	6.0
S8	Se 87	R	5.9	6.0
	Ma 88	R	5.9	6.0
S9	Ju 87	D	5.4	8.0
	Se 87	D	5.6	9.0
	Ma 88	D	5.7	2.0
S10	Ju 87	R	2.7	2.0
	Se 87	R	2.6	2.0

A pesar de estas limitaciones, el método Wenner ha demostrado su capacidad para definir las áreas de descarga y para estimar con un grado de precisión razonable el nivel freático en este tipo de perfiles de descarga. Ambos aspectos son de singular importancia para una agricultura de regadío sostenible, ya que permitirían detectar de forma temprana posibles ascensos freáticos, cuyas consecuencias son extremadamente negativas para los suelos y los cultivos.

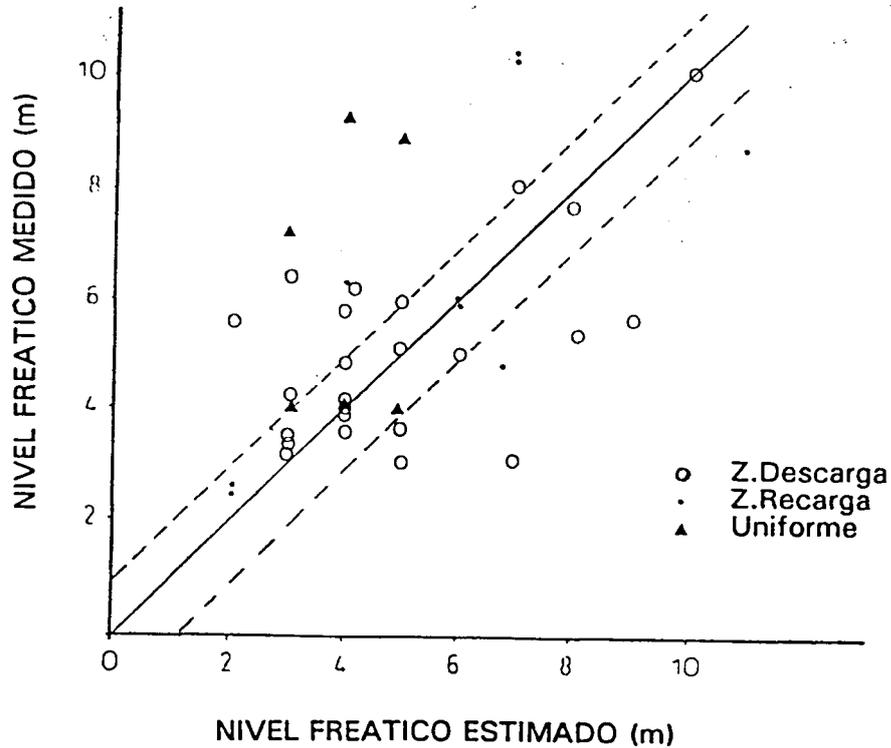


Figura 46. Estimación de niveles freáticos. Niveles freáticos medidos con sonda (metros) y estimados (metros) a partir de los perfiles de CE aparente acumulada (CE_{ac} , dS/m). Las líneas discontinuas representan una variación de ± 1 metro.

Tabla 49. Estimación de niveles freáticos. Número de observaciones que presentan un perfil determinado y porcentaje de éstos en los que la fiabilidad de la estimación está dentro de los intervalos ± 1 m, ± 1.5 m y ± 2 m .

PERFIL	TOTAL OBS.	Obs.estimadas dentro de cada intervalo					
		± 1.0 m		± 1.5 m		± 2.0 m	
		Nº	% Total	Nº	% Total	Nº	% Total
Descarga	24	13	54	16	67	18	75
Recarga	10	5	50	5	50	5	50
Uniforme	6	2	33	3	50	3	50