BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

Universidad de Zaragoza

Repercusiones medioambientales de la agricultura sobre los recursos hídricos de la Comunidad de Regantes nº V de Bardenas (Zaragoza)

Jesús Antonio Causapé Valenzuela

Tesis de Doctorado

Facultad: Ciencias Geológicas

Directores: Dra. Dolores Quílez Sáez de Viteri
Dr. Ramón Aragüés Lafarga

2002

REPERCUSIONES MEDIOAMBIENTALES DE LA AGRICULTURA SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA COMUNIDAD DE REGANTES Nº V DE BARDENAS (ZARAGOZA)

Jesús A. Causapé Valenzuela

Zaragoza, 2002

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS

Área de Petrología y Geoquímica

REPERCUSIONES MEDIOAMBIENTALES DE LA AGRICULTURA SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA COMUNIDAD DE REGANTES Nº V DE BARDENAS (ZARAGOZA)

memoria presentada por
JESÚS A. CAUSAPÉ VALENZUELA
en satisfacción de los requisitos necesarios
para optar al grado de doctor

Directores: Dra. DOLORES QUÍLEZ SÁEZ DE VITERI
Dr. RAMÓN ARAGÜÉS LAFARGA

Tutor: Dr. LUIS AUQUÉ SANZ

ZARAGOZA, SEPTIEMBRE 2002

a mi tierra

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

Agradecimientos

Conocedor de las dificultades que atravesamos los jóvenes a la hora de acceder al mercado laboral, estoy especialmente agradecido a la Unidad de Suelos y Riegos (SIA-DGA) por haberme ofrecido la oportunidad de solicitar una beca predoctoral ofertada por el Consejo Superior de Investigación y Desarrollo (DGA) en la convocatoria de 1999. Igualmente estoy agradecido al CONSI+D por la concesión de dicha beca sin la cual mi incorporación a la investigación hubiese sido imposible.

La integración de este estudio dentro del proyecto ADOR me ha permitido trabajar con el apoyo técnico y humano de varios organismos entre los que se encuentra el Servicio de Investigación Agroalimentaria (DGA), la Estación Experimental de Aula Dei (CSIC), la Comunidad de Regantes nº V de Bardenas, la Facultad de Geología de la Universidad de Zaragoza, Confederación Hidrográfica del Ebro y TRAGSA.

Sin duda, el mayor agradecimiento se lo debo al grupo de personas que me han ayudado durante los últimos cuatro años: desde Lola, Ramón y Luis (directores y tutor de la Tesis), que siempre me han ofrecido sus conocimientos y la libertad necesaria para mi desarrollo como investigador, hasta las gentes del campo de Bardenas, que me han enseñado lo que no se encuentra en los libros.

Espero haber correspondido con mi trabajo al esfuerzo de todas aquellas personas e instituciones que han hecho posible la elaboración de esta Tesis.

A todos ellos, gracias.

Este trabajo ha sido financiado por el Plan Nacional de I+D y fondos FEDER de la UE, Proyecto 2FD1997-0547.

El autor recibió una beca predoctoral del Consejo Superior de Investigación y Desarrollo (CONSI+D) del Gobierno de Aragón.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 1

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO 5

2.1 ENCUADRE GEOGRÁFICO 6

2.2 MARCO GEOLÓGICO 7

2.2.1 Geología general 7
2.2.2 Hidrogeología 9
2.2.3 Edafología 10

2.3 ANÁLISIS CLIMÁTICO 13

2.3.1 El clima en la cuenca del Arba 13
2.3.2 El clima en la Comunidad de Regantes nº V 14
2.3.3 El clima durante los años del estudio 15

2.4 ESTUDIO AGRONÓMICO 18

2.4.1 La Comunidad de Regantes nº V 18
2.4.1.1 Red de riego 18
2.4.1.2 Red de drenaje 19
2.4.1.3 Distribución de cultivos 20
2.4.2 Prácticas agrarias y manejo agronómico de los cultivos 21
2.4.2.1 Alfalfa 22
2.4.2.2 Maíz 23
2.4.2.3 Cereal de invierno 24
2.4.2.4 Girasol 24
2.4.2.5 Principales hortalizas 25
2.4.2.6 Otros cultivos 26
2.4.3 Consumo de agua de riego 27
2.4.3.1 Consumo de agua de riego por cultivos 27
2.4.3.2 Distribución temporal del consumo del agua de riego 28
2.4.3.3 Distribución espacial del consumo de agua de riego 29
2.4.4 Fertilización nitrogenada 29
2.4.4.1 Fertilización nitrogenada orgánica 29
2.4.4.2 Fertilización nitrogenada inorgánica 30

3. LAS AGUAS SUPERFICIALES 33

3.1 INTRODUCCIÓN 34

3.2 MATERIAL Y MÉTODOS 36

3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN. 39

3.3.1 Calidad de las aguas de la red de drenaje 39
3.3.1.1 Clasificación de los desagües según su *CE* y [NO_3^-] 40
3.3.1.2 Influencia del riego en la calidad de la red de drenaje 43
3.3.2 Calidad del río Riguel a su paso por la Comunidad nº V 45
3.3.2.1 Evolución espacial de la *CE* y [NO_3^-] 46
3.3.2.2 Evolución temporal de la *CE* y [NO_3^-] 47
3.3.3 Masa de sales y nitrato exportada a través de la red de drenaje 49
3.3.4 Reutilización del agua de drenaje para riego 50

3.4 CONCLUSIONES 51

4. LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS 52

4.1 INTRODUCCIÓN 53

4.2 MATERIALES Y MÉTODOS 56

4.2.1 Seguimiento de las aguas subterráneas de la Comunidad nº V 56
4.2.2 Modelización del régimen hidrológico del acuífero de Miralbueno; Programa *BAS-A* 57
4.2.3 Validación del modelo *BAS-A* en el pozo P-XXX-1 59
4.2.3.1 Determinación de la relación entre el nivel freático y su descenso diario en P-XXX-1 61
4.2.3.2 Determinación de la porosidad eficaz del acuífero de Miralbueno en P-XXX-1 62
4.2.4 Simulación de hipotéticos escenarios con *BAS-A* 65

4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN 66

4.3.1 Inventario de puntos de agua de interés en la Comunidad nº V 66
4.3.2 Piezometría y calidad de las aguas subterráneas de la Comunidad nº V 67
4.3.3 Validación de *BAS-A* en el pozo del acuífero de Miralbueno P-XXX-1 72
4.3.4 Simulación de escenarios en función del manejo del riego 73
4.3.5 Uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas para el riego 75

4.4 CONCLUSIONES 76

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

5. ANÁLISIS DE CUENCAS EXPERIMENTALES....77

5.1 INTRODUCCIÓN....78

5.2 MATERIALES Y MÉTODOS....80

5.2.1 Cuencas piloto: Descripción y caracterización....80
5.2.2 Balance de agua....82
5.2.2.1 Balance de agua en el suelo....82
Descripción del programa BAS....82
Entradas al programa BAS....83
Índices del manejo del agua....85
5.2.2.2 Balance de agua en el sistema acuífero....86
5.2.2.3 Balance global en las cuencas....89
5.2.3 Balance de sales y nitrógeno....89
5.2.3.1 Sales y nitrógeno en el riego y la lluvia....90
5.2.3.2 Sales y nitrógeno en los flujos subterráneos....91
5.2.3.3 Aporte de nitrógeno por fertilización....91
5.2.3.4 Aporte de nitrógeno por fijación simbiótica....91
5.2.3.5 Sales y nitrógeno en el drenaje superficial....92
5.2.3.6 Sales y nitrógeno en el drenaje subterráneo....93
5.2.3.7 Extracción de nitrógeno por las cosechas....93

5.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN....94

5.3.1 Caracterización de las cuencas piloto....94
5.3.1.1 Cultivos....95
5.3.1.2 Riego....96
5.3.1.3 Fertilización nitrogenada....96
5.3.2 Drenaje superficial de las cuencas....98
5.3.2.1 Régimen hidrológico de los desagües....98
5.3.2.2 Evolución de la *CE* en los desagües....100
5.3.2.3 Evolución de la [NO_3^-] en los desagües....102
5.3.2.4 Evolución de la masa de sales y nitrato en los desagües....103
5.3.3 Drenaje subterráneo en C-XXX-3....106
5.3.4 Balance hídrico anual (año hidrológico 2001)....108
5.3.4.1 Componentes del balance de agua en el suelo (*BAS*)....108
5.3.4.2 Balance global de agua en las cuencas....110
5.3.5 Balance de sales anual (año hidrológico 2001)....111
5.3.6 Balance de nitrógeno anual (año hidrológico 2001)....113
5.3.7 Calidad del riego....115
5.3.8 Efecto del manejo del riego y de la fertilización nitrogenada en la calidad de los flujos del drenaje propio de cada cuenca....118

5.4 CONCLUSIONES....122

6. CONCLUSIONES 125

7. BIBLIOGRAFÍA.....130

8. ANEJOS.....136

8.1 ANEJO 1.....137

8.2 ANEJO 2.....140

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

PRÓLOGO

La agricultura conservacionista actual difiere considerablemente de la agricultura productivista que conocieron nuestros antepasados. Así, en los países más desarrollados se exige que la intensificación de la actividad agraria sea compatible con la conservación y protección del medio ambiente y, en particular, de los recursos hídricos. Incluso en zonas protegidas de alto valor ecológico, se tiende a integrar la actividad agraria debidamente gestionada, como un componente más del medio natural.

Conocedores de estas exigencias, y motivados por el afán encomiable de mejorar el sistema agrario, la Comunidad de Regantes nº V de Bardenas (Aragón, España) puso la semilla de este trabajo, en el que se han diagnosticado los principales problemas medioambientales y se han establecido recomendaciones capaces de conciliar la productividad agraria con el respeto por el medio ambiente.

El estudio, detallado y riguroso, se ha realizado desde la perspectiva de diferentes disciplinas (agronomía, geología, edafología, hidrología, climatología, química...). Su enfoque ha contemplado tanto las aguas superficiales como las subterráneas, profundizándose en el conocimiento de los factores que determinan la cantidad y calidad de los flujos de retorno del riego a través del análisis detallado de cuencas hidrológicas representativas de la variabilidad agronómica y geológica presente en dicha Comunidad.

El trabajo, lejos de encerrarse en los límites de la Comunidad, plantea estrategias globales acerca del manejo de los recursos hídricos importados y exportados por la Comunidad, a la vez que promulga la necesidad de estudios a mayor escala.

Este trabajo deja constancia de los buenos resultados que se pueden llegar a obtener, de tal manera que debe esperarse que, en un futuro no muy lejano, puedan concretarse las acciones emprendidas por la Comunidad nº V y, en consecuencia, sobre su eficiencia y respeto medioambiental.

Dolores Quílez Sáez de Viteri
Ramón Aragüés Lafarga

Resumen

El regadío contribuye notablemente al aumento de la producción agraria, permite la diversificación de cultivos y proporciona cosechas más estables. Sin embargo, la agricultura intensiva de regadío puede provocar importantes afecciones medioambientales cuya intensidad depende del medio físico y del manejo agronómico de los insumos de producción (agua y agroquímicos). Así, junto a la necesidad de regular agua en cabecera y sus posibles impactos ambientales y sociales, el regadío puede inducir la contaminación por sales y nitrato de las aguas de drenaje, con el consiguiente efecto negativo sobre los sistemas receptores (ríos y acuíferos) que podrían limitar sus usos agrícola, industrial, urbano y ecológico.

Este trabajo se plantea en base a la necesidad de compatibilizar la actividad agraria con la conservación ambiental. Sus objetivos principales son identificar y cuantificar los principales problemas ambientales inducidos por el riego en la Comunidad de Regantes nº V de Bardenas (CR-V), profundizar en el conocimiento de los procesos que afectan a la cantidad y calidad de los recursos hídricos y prescribir técnicas apropiadas de manejo del agua y del nitrógeno para el control de la contaminación agraria.

Para ello, se realizó un seguimiento del sistema agrario (geología, clima y agronomía) así como de sus aguas superficiales (oct-99/sept-00) y subterráneas (jul-00/sept-01), y se efectuó un análisis detallado de tres cuencas hidrológicas midiendo o estimando las principales entradas y salidas de agua, sales y nitrógeno (oct-00/sept-01).

Las aguas subterráneas de la CR-V presentan una baja o moderada salinidad (CE_{media}= 0,89 dS/m) y un elevado contenido en nitrato ($[NO_3^-]_{media}$= 94 mg/L). Los valores respectivos en la red de drenaje son similares (CE_{media}= 0,87 dS/m) o inferiores ($[NO_3^-]_{media}$= 55 mg/L) debido a su dilución con escorrentías superficiales menos concentradas. La *CE* y $[NO_3^-]$ de las aguas de la CR-V aumenta en el sentido de los flujos hídricos (hacia el Sur) y en la época invernal (ausencia de riego). Las aguas del río Riguel (principal colector que atraviesa la CR-V) tienen unos valores mínimos de *CE* y $[NO_3^-]$ al inicio de la zona regable durante el período de riego (valores medios de 0,45 dS/m y 2 mg/L) y alcanzan los máximos valores a la salida de la CR-V durante el período sin riego (valores medios de 1,55 dS/m y 50 mg/L).

Los trabajos realizados en las tres cuencas indican que las eficiencias en el uso consuntivo del agua (entre 44 y 62% según cuencas) y las dosis (entre 203 y 357 kg N/ha cultivada/año) y fraccionamiento del N aplicado determinan los volúmenes de drenaje (entre 495 y 1.113 mm/año) y las concentraciones de nitrato (entre 21 y 77 mg/L) y masas de N exportadas por el drenaje (entre 23 y 195 kg N/ha/año). Así, hasta un 56% del N aplicado se pierde en el drenaje de la cuenca con suelos de saso y con mayores dosis de riego y fertilizante, mientras que las pérdidas disminuyen hasta el 16% del N aplicado en la cuenca preponderante en suelos de valle más profundos, regada por aspersión y con un mayor fraccionamiento (fertirriego) del N aplicado. A pesar de los elevados volúmenes de riego (entre 669 y 1.396 mm/año), las masas de sales exportadas por drenaje son relativamente bajas (entre 3,4 y 4,7 t/ha/año) debido a la baja salinidad de los suelos y del agua de riego (*CE*= 0,33 dS/m).

En definitiva, el estudio realizado en la CR-V de Bardenas detecta como principales problemas la ineficiencia en el uso del agua y el inadecuado manejo de la fertilización nitrogenada, lo que provoca elevados flujos de retorno de baja salinidad y alto contenido en nitrato. En consecuencia, la optimización de la fertilización nitrogenada (reducción de dosis y mayor fraccionamiento) y la mejora de la eficiencia del riego (reducción de dosis y riego por aspersión en suelos de saso), son dos factores clave para minimizar los impactos ambientales de este regadío. Estas medidas, junto con la reutilización de las aguas de drenaje de baja salinidad y elevados nitratos, incrementarían la eficiencia global de la CR-V, disminuirían el estrés hídrico de los cultivos, ahorrarían en fertilizantes, minimizarían las masas de sales y nitrato aportadas a los sistemas receptores de los flujos de drenaje (ríos Riguel, Arba y Ebro) y conservarían agua regulada de excelente calidad en su cota de origen (embalse de Yesa).

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

Desde los tiempos más remotos, el hombre ha mostrado un gran interés por dominar la naturaleza y poder explotar sus recursos. La creciente población mundial y las nuevas necesidades creadas en los países más desarrollados provocan que la presión ejercida sobre los recursos naturales sea cada vez mayor. Con el paso del tiempo, la sociedad es más consciente de la importancia de preservar el medio ambiente y por ello exige su protección.

El desarrollo de la actividad agraria sentó las bases de muchas de las sociedades actuales, convirtiendo al ser humano en un ser sedentario. Mediante la agricultura, el hombre ha podido generar productos primarios con los que abastecerse y comerciar.

El incremento de las necesidades alimentarias ha sido correspondido con aumentos de la producción agraria que se han obtenido gracias a la colonización de nuevas tierras, a la mejora de los cultivos y del manejo agronómico y al incremento de los insumos de producción (riego y agroquímicos). Hoy en día, el desarrollo de tecnología y la posibilidad de realizar un comercio a escala mundial siguen potenciando en los países más desarrollados la expansión agrícola aún cuando en muchos de ellos la población se encuentra estacionada.

La mecanización agraria de mediados del siglo XX produjo en Aragón un gran éxodo rural hacia las ciudades. Desde entonces, el sector agrario se dirige hacia la práctica de una agricultura crecientemente intensiva donde las explotaciones menores no pueden soportar la competitividad del mercado mundial. Esta situación conlleva una disminución de la población agraria, la cual ejerce su actividad con una orientación productivista como único camino hacia la sostenibilidad económica de sus explotaciones.

Bajo condiciones climáticas semiáridas, la transformación a regadío de las tierras de cultivo contribuye notablemente al aumento de la producción agraria y a la diversificación de cultivos, dotando además a las cosechas de una regularidad muy superior. Desde un punto de vista social, el regadío ha contribuido al desarrollo económico de zonas rurales y ha supuesto un freno a la despoblación. Sin embargo, la actividad agraria de regadío también provoca importantes afecciones medioambientales cuya intensidad depende del medio físico y del manejo agronómico de los insumos de producción (agua, fertilizantes, fitosanitarios...).

Junto a las repercusiones medioambientales que surgen de la necesidad de disponer de agua regulada, otras afecciones medioambientales importantes son la salinización y la contaminación por nitrato de las aguas de drenaje y su impacto potencial sobre los sistemas receptores de las mismas (ríos y acuíferos), que pueden limitar su uso agrícola, industrial, urbano y ecológico.

Agua

En España, la demanda consuntiva de agua alcanza los 30.400 Hm^3, de los cuales el 80% está destinado al uso agrícola, el 15% a usos urbanos y el 5% a uso industrial (MIMAM, 1998). Las grandes áreas regables de Aragón necesitan para su abastecimiento de la regulación en cabecera de los ríos pirenaicos, lo que conlleva la construcción de grandes obras hidráulicas (embalses y canales) en enclaves de alto valor ecológico y paisajístico. Estos embalses pueden llegar a inundar tierras de cultivo y núcleos poblados aunque también pueden llegar a convertirse en importantes espacios de interés turístico.

La construcción de estas presas y la puesta en regadío de grandes áreas altera la dinámica de ríos y acuíferos afectando a los distintos ecosistemas. Las zonas agrícolas de regadío abastecidas por aguas subterráneas pueden llegar a presentar problemas de sobrexplotación de acuíferos y/o intrusión marina.

Salinidad

Las sales presentes en el agua tienen como fuente natural primaria la meteorización geoquímica de los materiales geológicos. En un sistema agrario de regadío las principales masas de sales movilizadas proceden del agua de riego y de la disolución de los minerales de los suelos puestos en riego. Una adecuada conservación de los suelos exige que las sales no queden acumuladas por encima de unos valores que impidan un desarrollo normal de los cultivos, por lo que es necesaria su evacuación, produciendo un incremento de la salinidad en los sistemas receptores (ríos y acuíferos).

El límite admisible (Plan Hidrológico del Ebro) de conductividad eléctrica (*CE*) impuesto a las aguas superficiales que son destinadas a la producción de agua potable es de 2,5 dS/m, siendo mucho más exigentes los tratamientos para la potabilización de las aguas de mayor salinidad. La salinidad del agua también afecta negativamente a procesos industriales y al rendimiento de los cultivos (Aragüés *et al*, 1998) debido a la disminución del potencial osmótico de la solución del suelo, a la toxicidad iónica específica normalmente asociada a la absorción excesiva de cloruros y sodio, y a la interferencia de algunos iones con nutrientes esenciales para las plantas.

Contaminación por nitrato

BIBLIOTECA VIRTUAL

Se calcula que entre un 50 y un 90% de la carga de nitrato en las aguas tiene su origen en actividades agrarias (EEA, 1999). Tradicionalmente, el nitrógeno que extraían los cultivos del suelo era restituido por los aportes orgánicos de la ganadería, que se encontraba en equilibrio con la agricultura hasta que al final de los años 60 este equilibrio se rompió por la intensificación de estas actividades (Orús *et al*, 2001). Los fertilizantes minerales producidos por la industria química comienzan a ser abundantes y asequibles, y la ganadería ya no depende de las tierras de cultivo, consume piensos de zonas lejanas y genera una cantidad elevada de estiércoles con contenidos de nitrógeno importantes. Como consecuencia existe un exceso de nitrógeno en el suelo que, al convertirse en nitrato, es fácilmente lavado llegando hasta las aguas subterráneas y superficiales.

La ingestión de nitrato en cantidades excesivas tiene unos efectos perjudiciales para la salud provocando la enfermedad denominada metahemoglobinemia (Ramos y Ocio, 1993). Las autoridades sanitarias españolas y de la Unión Europea han establecido la concentración máxima tolerable de nitrato en el agua potable en 50 mg/L. Medioambientalmente, el enriquecimiento en nutrientes (nitrógeno y fósforo) de las aguas superficiales estimula el crecimiento de la vegetación acuática que al descomponerse consume el oxígeno disuelto en el agua provocando la muerte de los peces por asfixia.

La normativa sobre la gestión y la calidad del agua se establece en varias directivas de la Unión Europea. Entre ellas las que afectan especialmente a las actividades agrarias son la Directiva de Nitratos (1991), la Directiva de Control y Prevención Integrados de la Contaminación (1996) y la Directiva Marco del Agua (2000). En España, la aplicación de estas directivas ha establecido códigos de buenas prácticas agrarias, zonas declaradas vulnerables y programas de acción con medidas de obligado cumplimiento.

Objetivos

El presente trabajo surge ante la necesidad de compatibilizar la actividad agraria con la conservación y protección del medio ambiente. Se pretende estudiar el sistema agrario desarrollado en la Comunidad de Regantes nº V de Bardenas (CR-V) y sus principales afecciones medioambientales sobre los recursos hídricos de esta Comunidad.

Los objetivos específicos del estudio son:

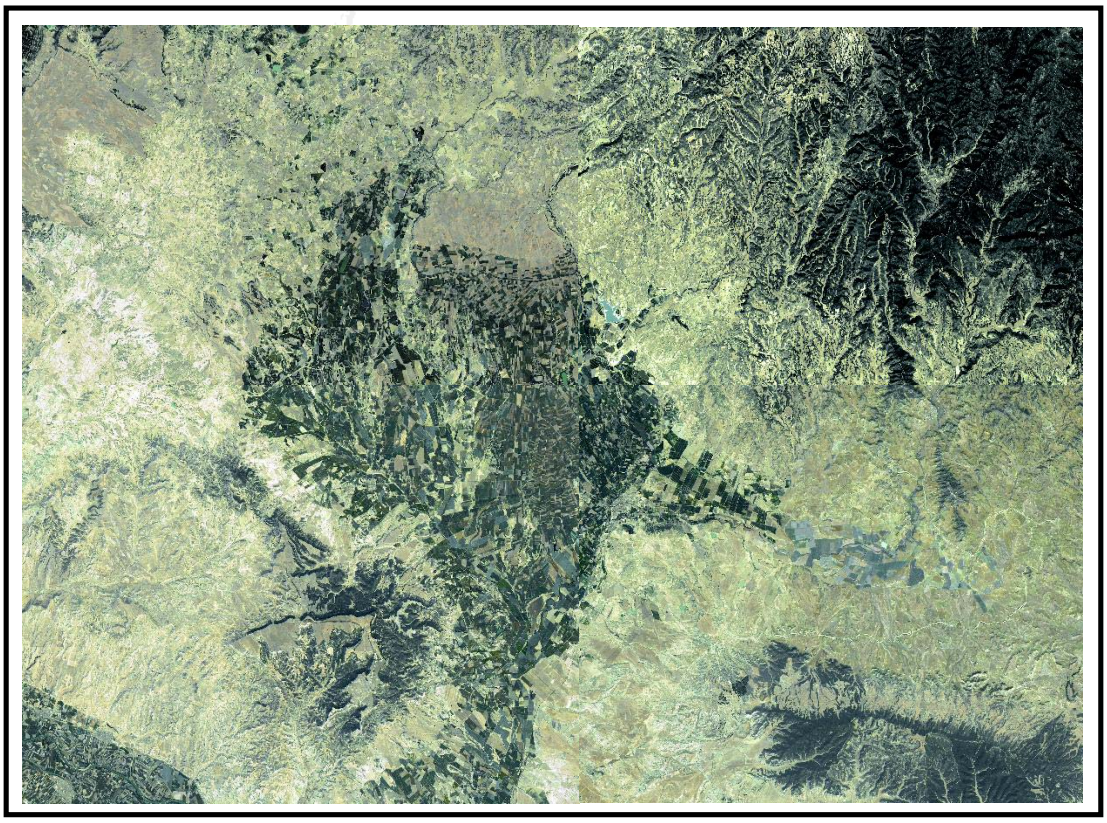
- ✓ Profundizar en el conocimiento del medio físico de la zona de estudio y en especial de las características geológicas y climáticas de la CR-V.
- ✓ Analizar las prácticas culturales agrarias de la CR-V prestando un mayor interés al manejo del riego y de la fertilización nitrogenada.
- ✓ Conocer la concentración de sales y nitrato en las aguas superficiales y subterráneas de la CR-V.
- ✓ Analizar la variabilidad espacio-temporal de la cantidad y calidad de los recursos hídricos de la CR-V identificando las zonas y períodos más problemáticos.
- ✓ Analizar el régimen hidrológico de los acuíferos y cursos fluviales de la CR-V.
- ✓ Estudiar el efecto que produce el modelo de agricultura desarrollado en la CR-V sobre las aguas del río Riguel.
- ✓ Cuantificar la cantidad (volumen de agua) y calidad (concentración y masa de sales y nitrato) de los flujos de retorno del regadío en tres cuencas piloto representativas de la variabilidad geológica y agronómica de la CR-V.
- ✓ Valorar posibles medidas que contribuyan a un mejor funcionamiento del sistema agrario desarrollado en la CR-V.

Los resultados del estudio permitirán ampliar el conocimiento de los procesos básicos relacionados con los recursos hídricos que intervienen en el sistema agrario.

El estudio del medio físico soporte del área regable y de sus interacciones con el manejo agronómico realizado permitirá establecer pautas que optimicen los insumos de producción minimizando los impactos medioambientales negativos, lo que constituye el objetivo final del estudio.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

BIBLIOTECA VIRTUAL



2.1 ENCUADRE GEOGRÁFICO

La zona regable de Bardenas se encuentra localizada en las Comunidades Autónomas de Aragón y Navarra comprendiendo parte de las cuencas hidrológicas de los ríos Arba y Aragón (afluentes del río Ebro) (Fig. 2.1).

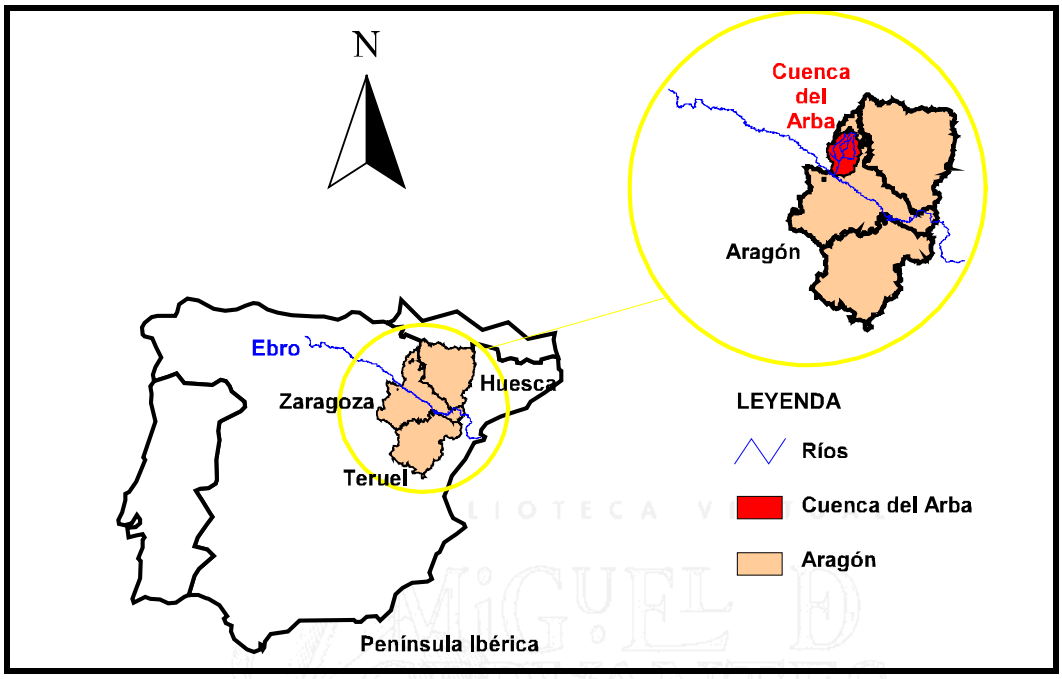


Figura 2.1. Situación de la cuenca del Arba dentro de la Península Ibérica y Aragón.

El denominado "sistema de riego Bardenas" fue puesto en marcha en el año 1958 con la construcción de la presa de Yesa y el Canal de Bardenas. El embalse de Yesa regula las aguas de la cabecera del río Aragón y cuenta con una capacidad máxima de 470 Hm^3. El Canal de Bardenas, que tiene su origen en el embalse de Yesa, presenta un caudal máximo en cabecera de 60 m^3/s. Aguas arriba de Sádaba deriva el Canal de la Pardina, que se ramifica en las acequias de Navarra y de Cinco Villas. Además de éstas cabe citar, entre otras, las acequias de Cascajos, del Saso y de Sora, que discurren por las divisorias de los principales cursos fluviales y por el límite del área regable de Bardenas.

El sistema formado por el embalse de Yesa y el Canal de Bardenas suministra agua de riego de excelente calidad (CE= 0,3 dS/m, y $[NO_3^-] < 2$ mg/L) a unas 52.000 ha y agua para el consumo de unos 50.000 habitantes. Los recursos hídricos del sistema de riego son asimismo aprovechados para generar electricidad mediante dos minicentrales eléctricas (La Pardina y Cinco Villas).

La Comunidad de Regantes nº V del Canal de las Bardenas (CR-V) abarca parte de la cuenca del Arba cuyos principales cursos fluviales nacen en la Sierra de Santo Domingo (límite Norte). Los ríos Arba de Luesia y Arba de Biel se unen en Ejea de los Caballeros para dar nombre al río Arba, que desemboca en el Ebro en Gallur (Zaragoza). El área regable dentro de esta cuenca viene limitada por el Canal de Bardenas (Norte) y por las acequias de las Cinco Villas (Oeste) y Sora (Este) (Fig. 2.2).

La CR-V es la más extensa de las que conforman la Comunidad General de Regantes del Canal de las Bardenas, ocupando 17.685 ha de las que 15.498 ha son de regadío (Laplaza, 1998). La CR-V se encuadra en la provincia de Zaragoza y, concretamente, en los términos municipales de Ejea de los Caballeros, Biota y Sádaba. El río Riguel, afluente del Arba, divide longitudinalmente la CR-V y actúa como principal colector de sus retornos de riego. Otro curso fluvial importante es el barranco de Valareña que, junto al río Arba de Luesia y al Canal de Bardenas, constituye los límites de la CR-V (Fig. 2.2).

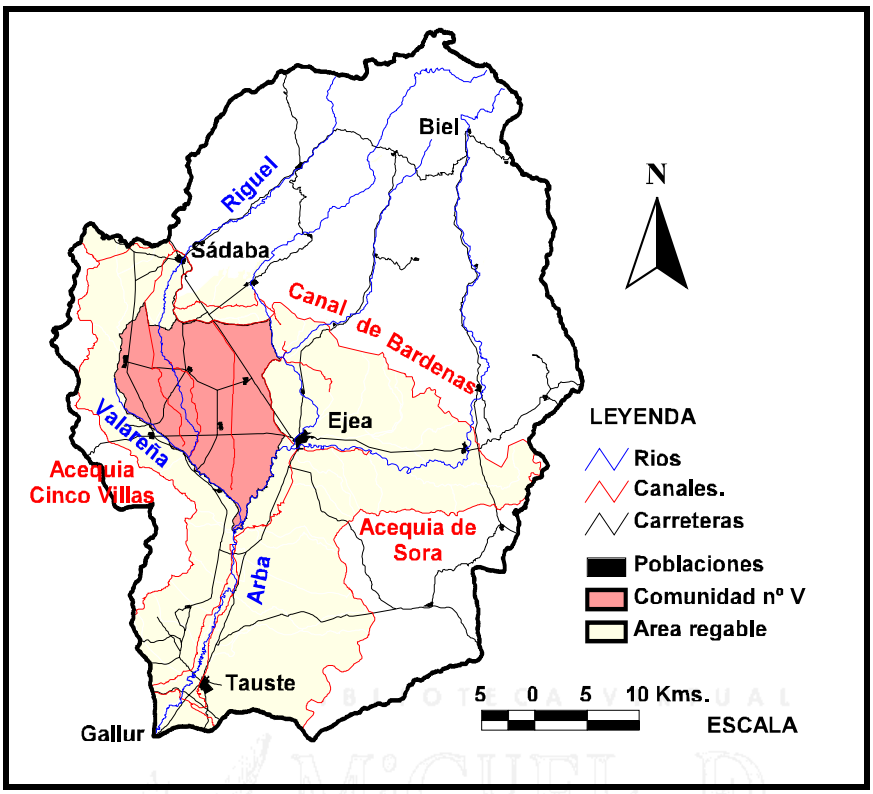


Figura 2.2. Encuadre geográfico del área de estudio: cuenca del Arba, Comunidad de Regantes nº V y principales canales/acequias y ríos.

2.2. MARCO GEOLÓGICO

2.2.1 Geología general

Se ha utilizado como información base la cartografía publicada por el ITGE (hojas 1:50.000 de Ejea, Sádaba y Fustiñana; hojas 1:200.000 de Tudela y Zaragoza).

Prácticamente la totalidad de la cuenca del Arba se encuentra en el dominio geológico de la depresión del Ebro (Fig. 2.3). La cuenca del Ebro es una cuenca clástica sin-tardiorogénica asociada a la orogénesis alpina donde la evolución de la sedimentación está estrechamente ligada al desarrollo de los acontecimientos tectónicos.

El relleno de la cuenca del Arba está formado por materiales marinos depositados durante el Eoceno y por materiales continentales de edad Oligoceno y Mioceno. El aporte fue fundamentalmente del Sur hasta el Oligoceno Superior, momento en el cual tuvo lugar la tercera fase del plegamiento pirenaico que produjo un cambio en el sentido de los aportes (Norte).

Los sedimentos tienen carácter molásico en los bordes de la cuenca, pasando a facies lutíticas hacia el centro de la misma, donde se pueden encontrar unidades carbonatadas y evaporíticas. Existe una secuencia de ambientes de sedimentación en el sentido de los aportes, desde los conos aluviales del borde, pasando por ambientes fluviales anastomosados y meandriformes, hasta los depósitos lacustres del centro de la cuenca.

Los materiales de mayor importancia para este trabajo son los que ocupan la cuenca media y baja del Arba, área donde se ha desarrollado la agricultura de regadío.

El Mioceno de la zona más septentrional (correspondiente a las hojas 1:50.000 de Sádaba, Luna, Fustiñana y Ejea) constituye un tramo lutítico con presencia de niveles de areniscas que son más abundantes hacia el techo. Estos niveles de arenisca están relacionados con paleocanales que presentan base erosiva, granoclasificación decreciente y estratificaciones cruzadas. Básicamente presentan una matriz de cuarzo y cemento de carbonato cálcico.

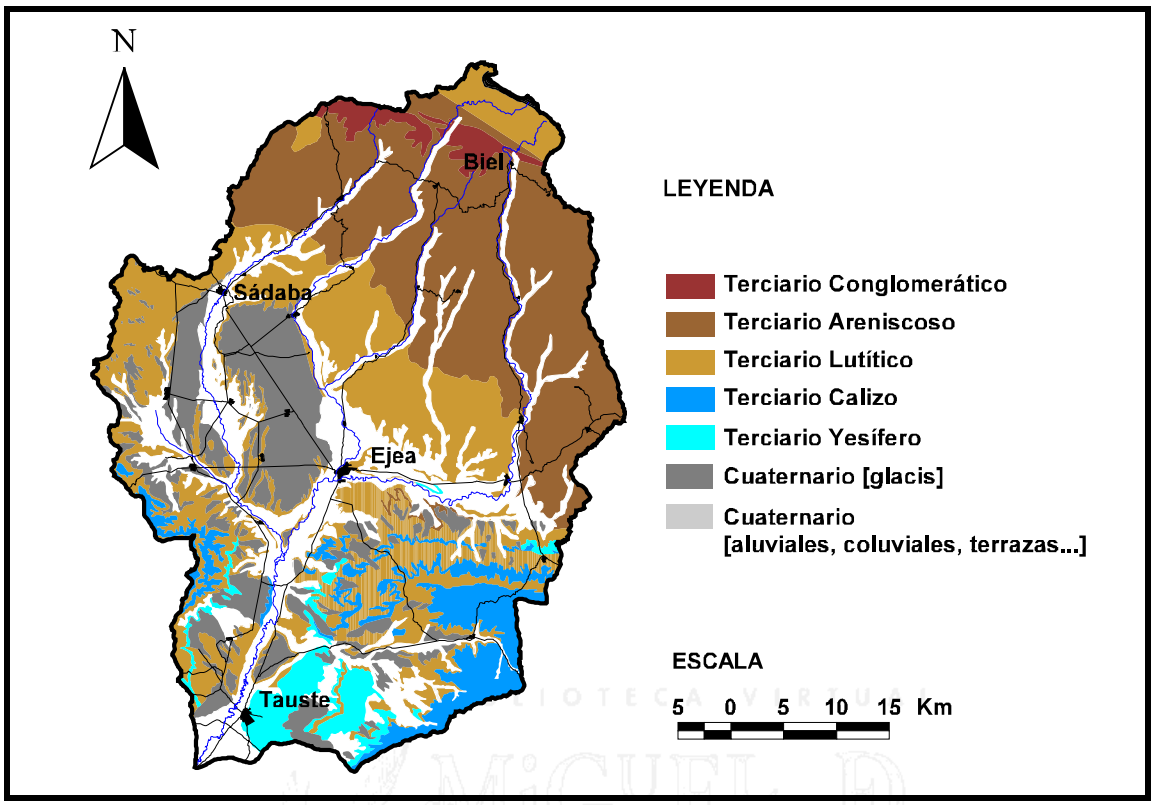


Figura 2.3. Mapa geológico de la cuenca del Arba (Información base: cartografía ITGE).

Hacia el Sur los niveles de arenisca van perdiendo potencia y comienzan a aparecer bancos de calizas lacustres. Existen zonas de arcillas y limos más o menos calcáreos, de tonos rojizos y grises, con intercalaciones esporádicas de areniscas de grano fino poco cementadas y de limolitas.

El Mioceno en la parte más meridional (Tauste) corresponde a facies centrales de cuenca y consiste en una alternancia de yesos, arcillas y limos, de tonos pardos y grises, con intercalaciones ocasionales de finas capas de calizas de grano fino asociadas a los yesos.

La potencia de toda esta serie es variable dependiendo de la paleogeografía del medio sedimentario. Según sondeos petrolíferos de la zona, los espesores de los sedimentos terciarios pueden alcanzar los 2.700 metros.

Los materiales cuaternarios (glacis y aluviales) constituyen los principales niveles acuíferos de la zona y se asientan sobre las arcillas, limos, y areniscas ("buro" en terminología local) de las formaciones terciarias, las cuales forman a su vez el sustrato impermeable en función del cual varía el espesor de la capa freática.

La Figura 2.4 muestra el depósito cuaternario sobre el terciario continental lutítico-areniscoso. Se puede observar como el contacto es irregular y como la vegetación del talud se sitúa en la base de las gravas, punto al que llega el agua infiltrada en el glacis.

El desarrollo de los glacis se ha visto favorecido por la facilidad de los materiales terciarios a ser erosionados y por la existencia de conglomerados en el borde Norte de la cuenca que actúan como área fuente. Litológicamente están formados por cantos homométricos (calizas mesozoicas y eocenas, y cuarcitas) angulosos y subredondeados englobados en matriz arcillosa, con tramos ocasionales de arcillas y limos intercalados en las gravas ("saso" en terminología local). Estas gravas pueden estar cementadas por carbonato cálcico formando pequeños bancos de conglomerados ("mallacán" en terminología local).

Los aluviales presentan dos tramos bien diferenciados, uno inferior en el que predominan las gravas y otro superior formado por arcillas, limos y arenas que engloban cantos dispersos.

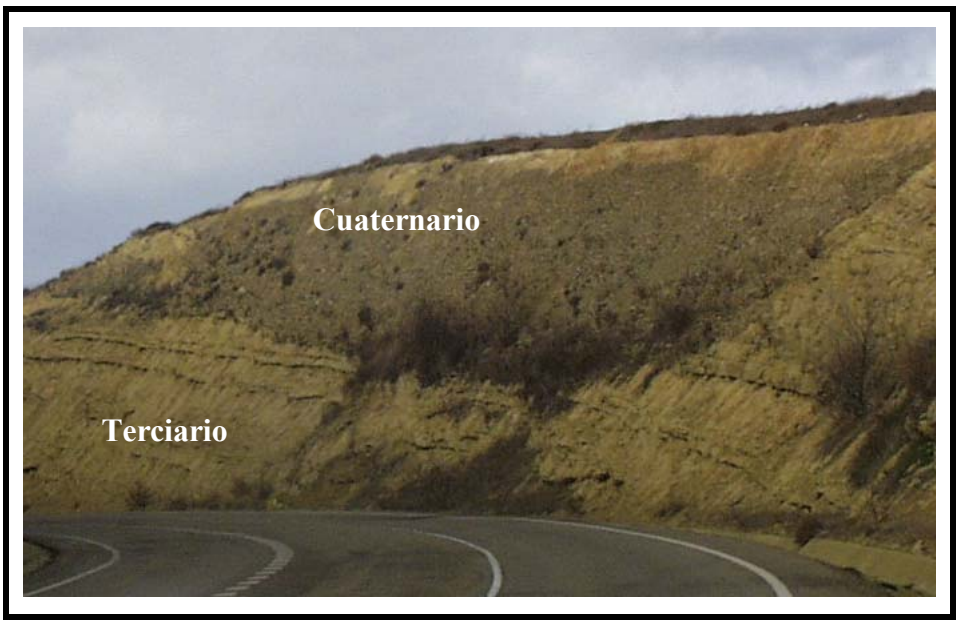


Figura 2.4. Contacto entre el terciario lutítico-areniscoso y el cuaternario del glacis de Miralbueno. Carretera Ejea de los Caballeros – Sádaba.

La CR-V se sitúa sobre los glacis de Miraflores (50 km^2) al Oeste y de Miralbueno (120 km^2) al Este, separados ambos por el aluvial del Riguel. En las laderas que separan los glacis de los aluviales afloran los materiales lutíticos areniscosos del terciario continental.

2.2.2 Hidrogeología

Los principales niveles acuíferos son los asociados a los glacis de Miralbueno y Miraflores así como a los aluviales de los ríos. La potencia de los glacis depende de la geomorfología del sustrato terciario y decrece de Norte a Sur, donde alcanza espesores menores de 2 m. El contacto con los materiales terciarios es irregular y se pueden encontrar espesores en el Norte del glacis de Miralbueno de 30 metros en los surcos y de 20 metros en los umbrales. La potencia del glacis de Miraflores es sensiblemente inferior (ITGE, 1985).

La Figura 2.5 presenta el esquema de un corte Norte-Sur del glacis de Miralbueno donde se ha exagerado la escala vertical permitiendo observar el contacto irregular con el terciario y el acuñamiento general del glacis hacia el Sur (ITGE, 1985).

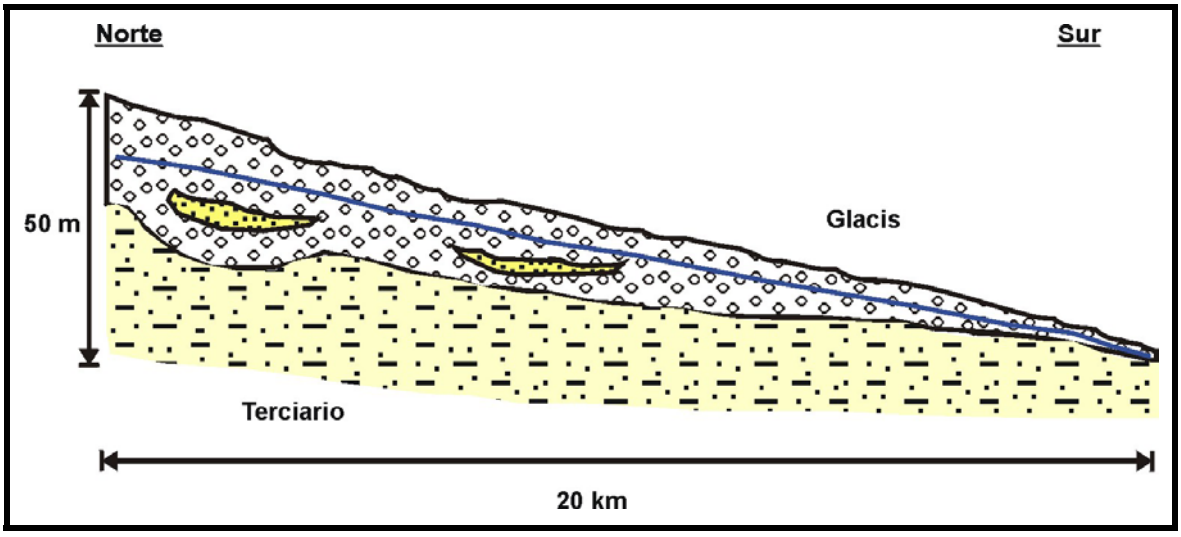


Figura 2.5. Corte geológico esquemático N-S del glacis de Miralbueno (ITGE, 1985).

Los glacis constituyen acuíferos permeables por porosidad intergranular de una sola capa, de carácter libre y colgado, sin conexión hidráulica con otros acuíferos, salvo el de Miraflores que está conectado con el aluvial del Riguel en su límite oriental. Las formaciones

aluviales constituyen acuíferos permeables por porosidad intergranular, de una sola capa y de carácter libre. La Figura 2.6 presenta un corte hidrogeológico esquemático Este-Oeste, mostrando la relación entre los acuíferos asociados a los glacis y aluviales.

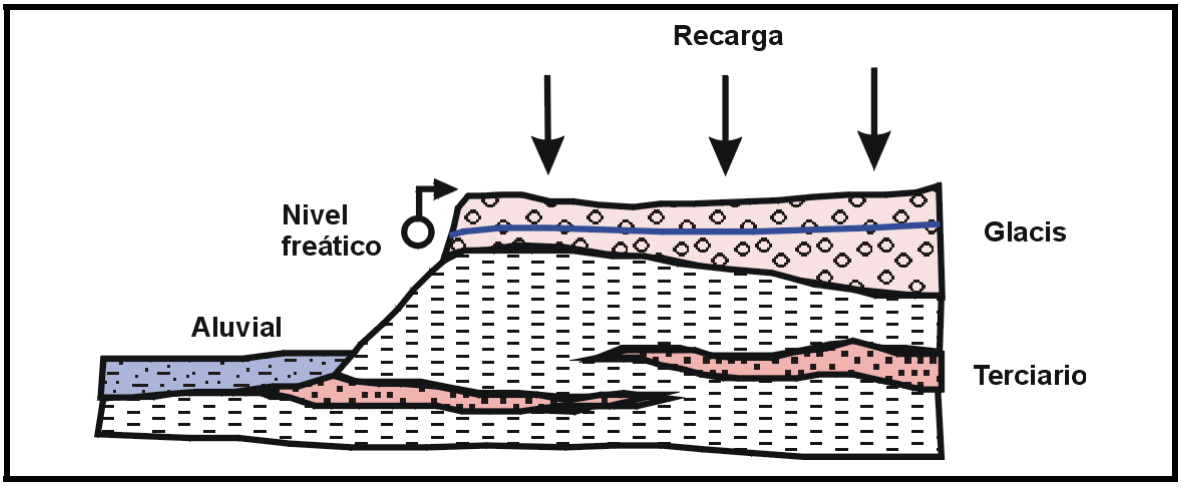


Figura 2.6. Corte hidrogeológico esquemático (ITGE, 1985).

La alimentación de estos acuíferos proviene de los retornos de riego y de las precipitaciones mientras que la descarga se produce a través de los ríos (principales ejes de drenaje) hacia donde converge un gran número de zanjas drenantes.

La Figura 2.7 muestra la importancia del riego en la alimentación de los acuíferos comparando las diferencias en el desarrollo de la vegetación sobre las laderas de dos glacis. Sobre el glacis en riego, los volúmenes de recarga son elevados lo que provoca un amplio desarrollo de vegetación en sus laderas. En cambio en las laderas del glacis que no se ha puesto en riego la vegetación es prácticamente inexistente.

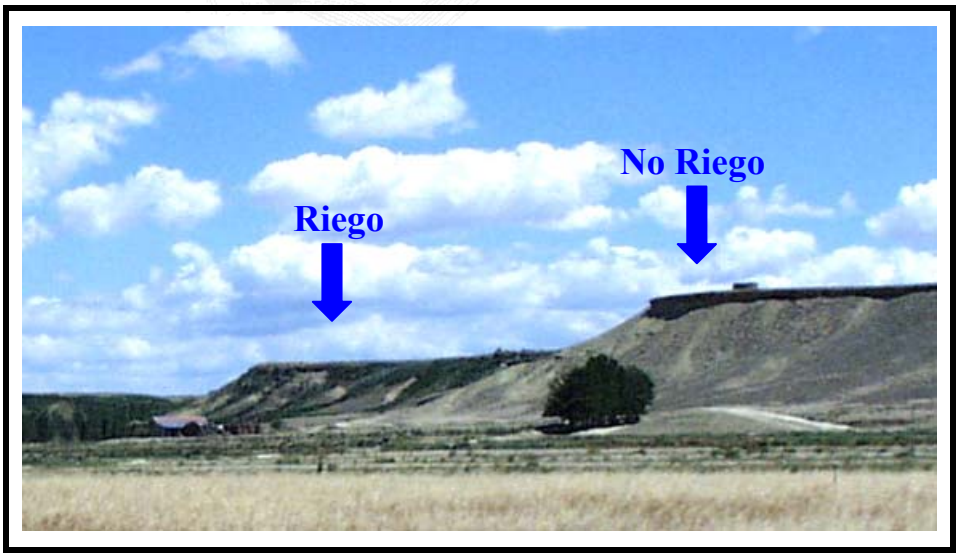


Figura 2.7. Vegetación sobre las laderas de glacis en riego y glacis sin riego.

2.2.3 Edafología

Al objeto de caracterizar los suelos de la CR-V atendiendo a sus propiedades hídricas, se procedió a la realización de un muestreo durante el invierno 99-00.

El muestreo se planificó en base a la información de suelos recogida por Martínez Beltrán (1978) y de la cartografía litogeomorfológica de los suelos del polígono de riego Bardenas I realizada por Basso (1994).

El muestreo se centró únicamente en los suelos desarrollados sobre glacis y aluviales debido a que éstos ocupan la práctica totalidad de la CR-V. En los suelos de saso se procedió a

la apertura de 40 calicatas mediante una retro-excavadora con cazo de 60 cm. En los suelos de aluvial se muestrearon 10 puntos utilizando una barrena manual tanto para la descripción del perfil como para la toma de muestras. La Figura 2.8 presenta el mapa de suelos de la CR-V elaborado por Basso (1994) y la situación de las calicatas y sondeos realizados en este estudio.

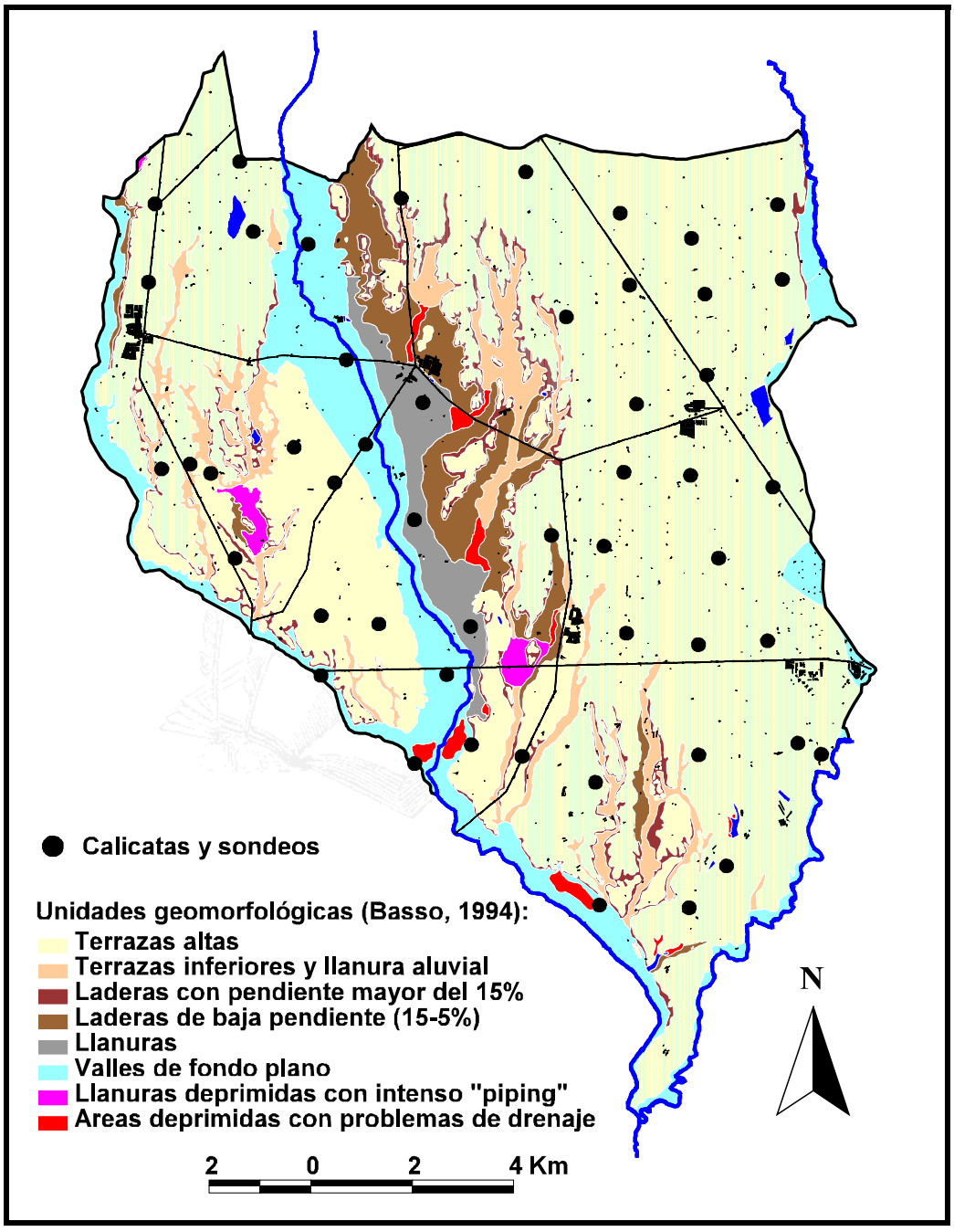


Figura 2.8. Mapa litogeomorfológico de la CR-V (Basso, 1994) con la localización de las calicatas y sondeos realizados en el presente estudio.

El estudio de los 50 perfiles se realizó hasta la profundidad efectiva, que es la profundidad máxima que alcanzan las raíces de los cultivos de la zona (120 cm de profundidad) o, en su caso, hasta encontrar una capa limitante al paso de éstas.

La Figura 2.9 muestra una calicata representativa de los suelos de saso (desarrollados sobre los glacis) donde se observa un suelo pedregoso cuya profundidad está limitada por la existencia de mallacán (horizonte petrocálcico). Por el contrario, en la calicata del suelo del aluvial del Riguel se observa un perfil con ausencia de elementos gruesos (> 2 mm) y profundo.

Figura 2.9. Perfiles típicos del suelo desarrollados en los sasos y aluviales de la CR-V.

A partir de muestras recogidas en cada uno de los horizontes del suelo se determinaron en laboratorio la pedregosidad, la densidad aparente y los puntos característicos de retención de humedad a 0,03 (capacidad de campo, *CC*) y 1,5 Mpa (punto de marchitez, *PM*) según el Soil Survey Laboratory (1.996). La Tabla 2.1 presenta los resultados más relevantes del muestreo de los suelos de la CR-V. La fracción de elementos gruesos media en los suelos desarrollados sobre el glacis es del 22% con una variabilidad alta (CV= 64%) mientras que los suelos de aluvial no presentan elementos gruesos. En los sasos la capacidad de campo (*CC*) media de la matriz del suelo es del 27% y el punto de marchitez (*PM*) medio es del 18%, de lo que se deducen unas texturas francas a franco-arenosas. En cuanto a los aluviales presentan una *CC* media de la matriz del suelo del 38% y un *PM* medio del 22% reflejando texturas franco-arcillosas.

Tabla 2.1. Resultados medios de los perfiles estudiados en el muestreo de suelos. Profundidad efectiva, elementos gruesos, capacidad de campo de la matriz (*CC*), punto de marchitez de la matriz (*PM*) y capacidad de retención de agua útil para las plantas (*CRA*) ponderada por horizontes para los suelos sobre aluviales y sobre sasos.

	Suelos sobre aluviales	Suelos sobre sasos
Profundidad efectiva (cm)	120	87
Elementos gruesos (% V)	0	22
***CC* matriz (% V)**	38	27
***PM* matriz (% V)**	22	18
***CRA* (mm)**	182	60

La capacidad de retención de agua (*CRA*) definida como el volumen de agua utilizable por las plantas que es capaz de retener un suelo, se ha calculado como la diferencia entre el contenido de agua a *CC* y a *PM* para el perfil del suelo que abarca la profundidad efectiva. La *CRA* en los suelos desarrollados sobre aluviales (182 mm) es muy superior a la de los desarrollados sobre los sasos (60 mm). Este hecho es debido a la mayor capacidad de retención de agua en la matriz de los suelos aluviales (16% frente al 9% de media en los sasos) y a las mayores profundidades efectivas de los suelos aluviales (120 cm) frente a las de los sasos (87 cm) a causa de la existencia de horizontes petrocálcicos en éstos últimos.

Estos dos tipos de suelos no presentan problemas de sales y son adecuados para el desarrollo de la agricultura de regadío. Los únicos problemas en los suelos desarrollados sobre glacis están relacionados con la elevada pedregosidad y la presencia de mallacán, que limita su profundidad y por tanto la capacidad de retención de agua disponible para las plantas.

Además de los suelos desarrollados sobre glacis, terrazas y aluviales, Basso (1994) describe otros tipos de suelos menos representados en la CR-V. Entre ellos describe suelos poco profundos desarrollados en laderas que tienen como sustrato las formaciones terciarias y suelos con problemas de salinidad y sodicidad desarrollados en depresiones con mal drenaje (Fig. 2.8).

2.3 ANÁLISIS CLIMÁTICO

2.3.1 El clima en la cuenca del Arba

Para analizar las características climáticas de la cuenca del Arba, donde se localiza la CR-V, se han utilizado los datos correspondientes al período 1949-1984 de un conjunto de 11 observatorios para la temperatura y de 44 observatorios para la precipitación distribuidos homogéneamente por el interior y periferia de la cuenca del Arba (ITGE, 1985). Tanto la precipitación como la temperatura están claramente influenciadas por la altitud. Las isotermas e isoyetas de la cuenca del Arba, muestran un gradiente general Norte-Sur coincidente con la topografía (Fig. 2.10).

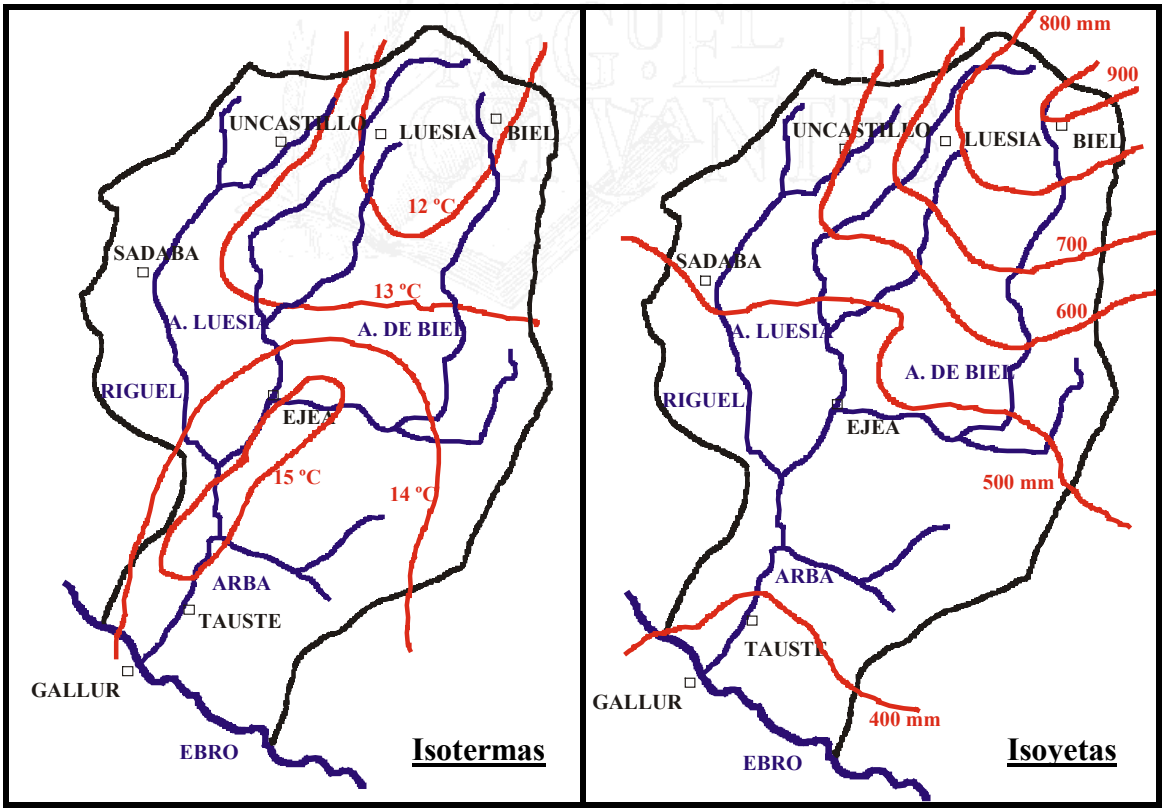


Figura 2.10. Mapas de isotermas e isoyetas anuales medias de la cuenca del Arba para el período 1949-1984 (ITGE, 1985).

Según estos datos, las temperaturas anuales medias están comprendidas entre 11,3 ºC (Luesia) y 15,5 ºC (Ejea de los Caballeros). Para el conjunto de observatorios, los meses más cálidos son julio y agosto, con 23,7 ºC y 22,9 ºC respectivamente, y los más fríos enero con 5,4 ºC, diciembre con 5,7 ºC y febrero con 6,8 ºC.

La precipitación anual media de toda la zona es del orden de 550 mm. Las más bajas corresponden al Sur de la cuenca, con precipitaciones inferiores a los 400 mm (346 mm de media anual en Gallur). Las mayores precipitaciones se registran al Noreste donde se alcanzan valores superiores a los 900 mm (908 mm de media anual en Biel).

A partir de los datos analizados, el ITGE (1985) estableció una relación entre la precipitación anual media (P) y la cota del observatorio (h) según la recta $P = 179{,}56 + 0{,}74h$ con un coeficiente de determinación $r^2 = 0{,}872$.

2.3.2 El clima en la Comunidad de Regantes nº V

Para la caracterización climática de la zona de estudio se han usado los datos correspondientes al período 1965-1994 proporcionados por la estación meteorológica de Santa Anastasia del Instituto Nacional de Meteorología (INM), siendo su situación la siguiente:

Indicativo climático:	9-333	Altitud:	321 m.s.n.m.
Latitud:	42º 07´ 58´´ N	Longitud:	01º 13´ 27´´ W

La zona se caracteriza por tener veranos calurosos e inviernos fríos con elevadas oscilaciones térmicas diarias (Tabla 2.2, Fig. 2.11). El período frío (que según el criterio de Emberger comprende aquellos meses en los que la media de las mínimas sea menor de 7 ºC) transcurre desde el mes de noviembre al mes de abril y el período cálido (meses con media de máximas superior a 30 ºC) únicamente comprende los meses de julio y agosto. En cuanto al período libre de heladas, se sitúa entre los meses de mayo y octubre.

Tabla 2.2. Temperatura mensual mínima, media y máxima, y precipitación mensual en la estación meteorológica de Santa Anastasia para el período 1965-1994.

	Temperatura mín. media (ºC)	Temperatura media (ºC)	Temperatura máx. media (ºC)	Precipitación media (mm)
Enero	1,7	5,1	8,5	25,4
Febrero	3,0	7,1	11,2	30,4
Marzo	4,7	9,4	14,2	27,6
Abril	6,7	11,6	16,6	44,3
Mayo	10,4	16,2	22,1	49,7
Junio	13,8	20,2	26,7	41,7
Julio	16,5	23,9	31,3	19,9
Agosto	16,9	24,0	31,1	23,9
Septiembre	13,9	20,2	26,5	33,1
Octubre	10,3	15,0	19,6	45,1
Noviembre	5,1	9,1	13,1	48,8
Diciembre	2,7	5,9	9,0	28,6
	media	**media**	**media**	**total**
	8,8	14,0	19,2	419,0

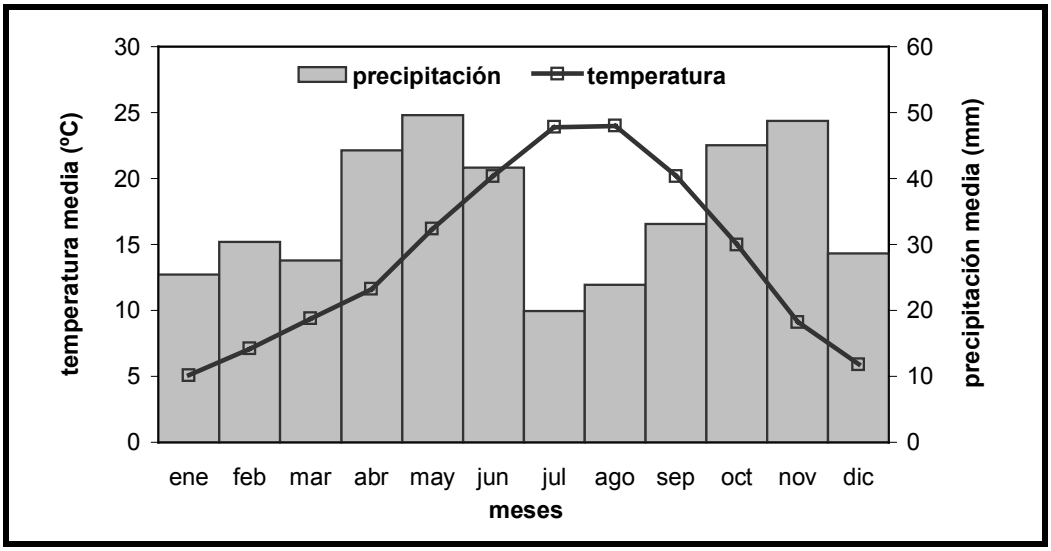


Figura 2.11. Temperaturas medias mensuales (ºC) y precipitaciones medias mensuales (mm) registradas en la estación de Santa Anastasia en el período 1965-1994.

La precipitación anual media es de 419 mm, repartiéndose de forma desigual a lo largo del año. Las estaciones de primavera y otoño son las más lluviosas mientras que verano e invierno son las más secas.

Según la clasificación bioclimática UNESCO-FAO, este clima se encuadra dentro del tipo xérico mediterráneo, subtipo mesomediterráneo atenuado.

La evapotranspiración de referencia media mensual (ET_0), se calculó mediante la metodología de Hargreaves (Allen *et al.*, 1998) y la precipitación efectiva (*PE*) se estimó según el método propuesto por el *Soil Conservation Service* del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Cuenca, 1989). La Figura 2.12 indica que la evapotranspiración de referencia es superior a la precipitación efectiva durante todos los meses del año, alcanzándose el mayor desequilibrio en el mes de julio, que presenta una ET_0 de 189,9 mm y una *PE* de tan solo 17,9 mm. La evapotranspiración de referencia anual asciende a 1.084 mm, mientras que la precipitación efectiva acumulada durante todo el año es de 298 mm.

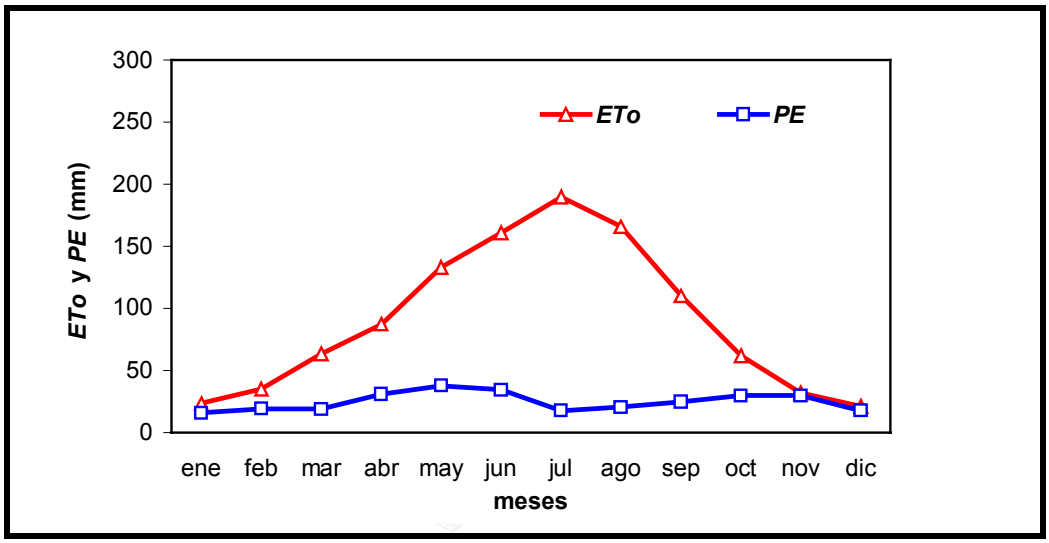


Figura 2.12. Evapotranspiración de referencia (ET_0, mm) y precipitación efectiva (*PE*, mm) media mensual en la estación meteorológica de Santa Anastasia durante el período 1965-1994.

De estos resultados se deduce que las necesidades hídricas no pueden ser únicamente cubiertas por la lluvia, especialmente en los cultivos de verano o época de máxima evapotranspiración y mínimas precipitaciones, por lo que para una producción agrícola aceptable es necesario el riego durante la mayor parte del año.

2.3.3 El clima durante los años del estudio

En mayo de 1999 se instaló en las cercanías de Santa Anastasia, centro geográfico de la CR-V, una estación meteorológica automática Campbell (Fig. 2.13). Su situación viene definida por las siguientes coordenadas:

Identificación:	CR10-Ejea	Altitud:	380 m.s.n.m.
Latitud:	42 º 10´ 13´´ N	Longitud:	01º 12´ 50´´ W

La estación meteorológica automática registra datos de precipitación, temperatura y humedad relativa del aire, radiación solar y dirección y velocidad del viento. Estos datos permitieron el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0) por el método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998).

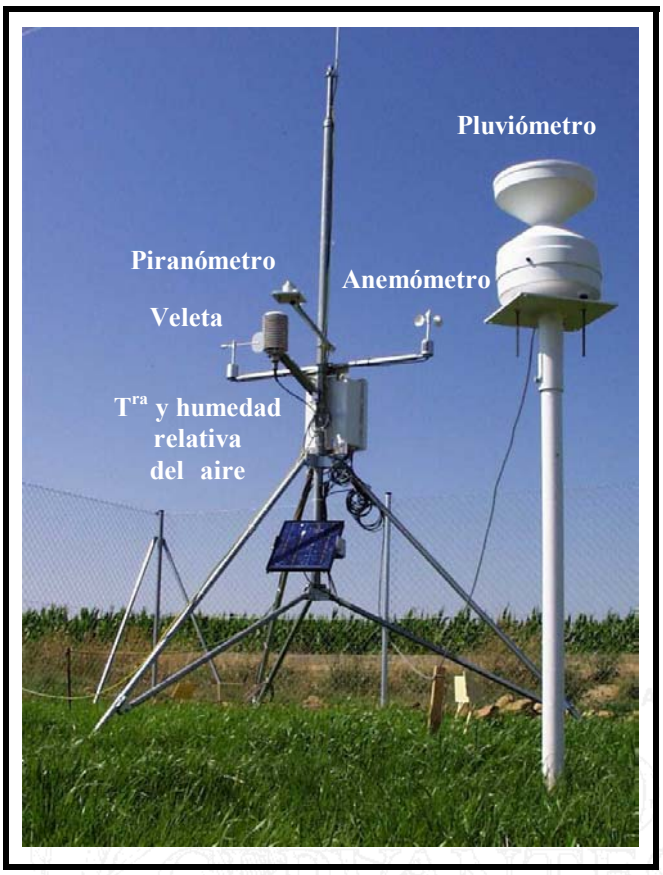


Figura 2.13. Estación meteorológica automática (CR10-Ejea).

Las temperaturas medias de los dos años de estudio (media anual $_{99\text{-}00}$= 13,0 ºC; media anual $_{00\text{-}01}$= 13,6 ºC) fueron parecidas a las del registro histórico (media anual $_{65\text{-}94}$= 14,0 ºC). El invierno de 1999-2000, al contrario que el de 2000-2001, fue menos frío que el registro histórico. Los dos veranos del estudio presentaron temperaturas medias mensuales ligeramente inferiores a la media obtenida para el período 1965-1994 en la estación de Santa Anastasia (Fig. 2.14).

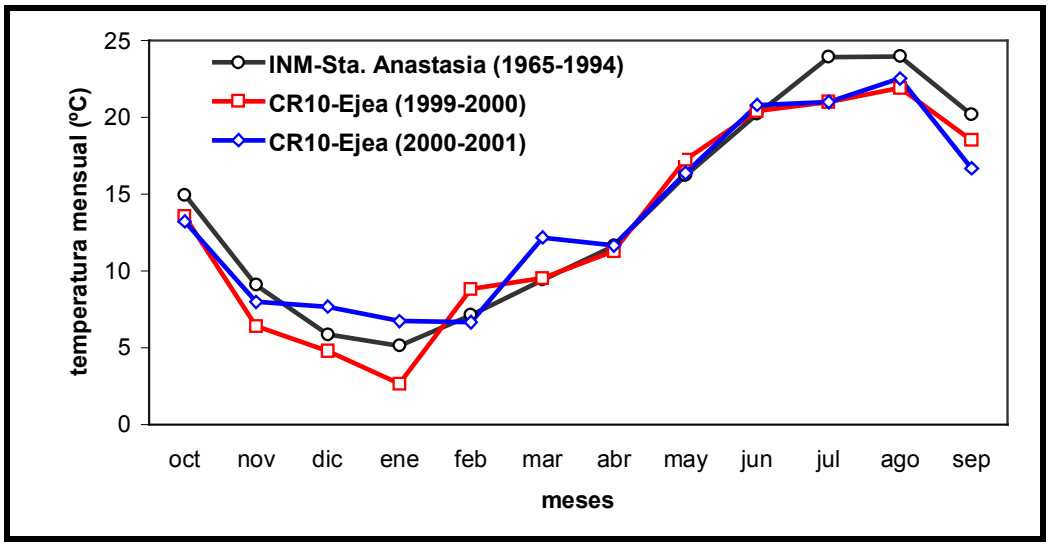


Figura 2.14. Temperatura media mensual (ºC). Registro histórico de la estación de Santa Anastasia (1965-1994) y registros en la estación meteorológica automática (CR10-Ejea) durante los años hidrológicos oct-99/sept-00 y oct-00-sept-01.

La Figura 2.15 compara la evapotranspiración de referencia mensual (ET_0) de los dos años de estudio, calculada mediante el método Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), y la histórica. Esta última se calculó mediante el método de Hargreaves debido a que la estación de Santa Anastasia únicamente registra datos de temperatura y precipitación. La ET_0 durante los dos años de estudio ($ET_{0\ 99\text{-}00}$ anual= 1.088 mm; $ET_{0\ 00\text{-}01}$ anual= 1.085 mm) fue similar a la del registro histórico ($ET_{0\ 65\text{-}94}$ anual= 1.084 mm).

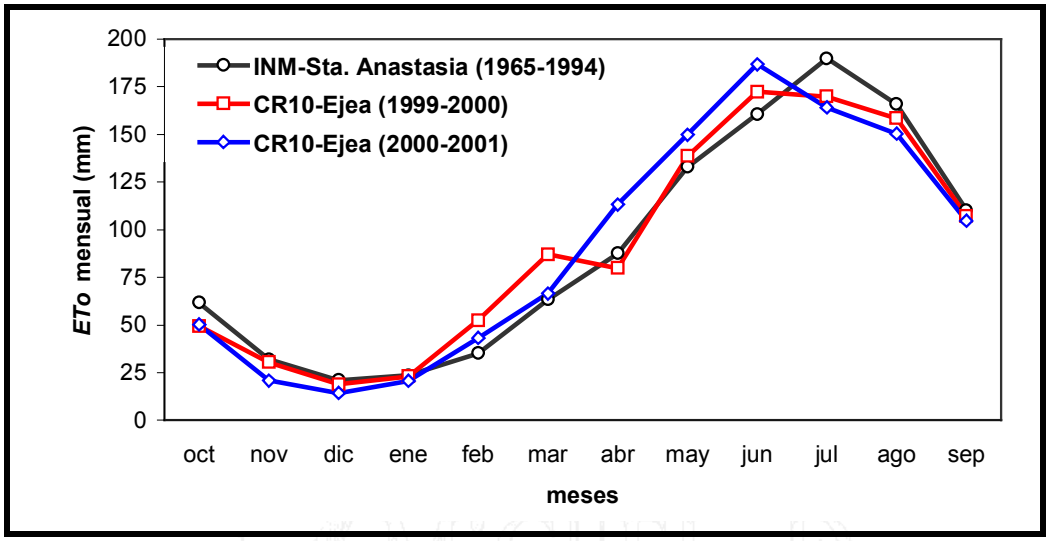


Figura 2.15. Evapotranspiración de referencia mensual (ET_0, mm). Registro histórico de la estación de Santa Anastasia (1965-1994) y registros en la estación meteorológica automática (CR10-Ejea) durante los años hidrológicos oct-99/sept-00 y oct-00/sept-01.

Durante el primer año de estudio (oct-99/sept-00) la precipitación anual ($P_{99\text{-}00}$= 325 mm) fue sensiblemente menor que la media histórica registrada en la estación de Santa Anastasia ($P_{65\text{-}94}$= 419 mm). Destaca el hecho de que, dentro de la tendencia a ser un año seco, las precipitaciones del mes de abril superaron ampliamente a la media histórica (Fig. 2.16).

Las fuertes lluvias otoñales del año 2000 provocaron que el año hidrológico oct-00/sept-01 fuera mucho más húmedo que el registro histórico ($P_{65\text{-}94}$= 419 mm; $P_{00\text{-}01}$= 526 mm) a pesar de que los meses de mayo y junio de 2001 fueron extremadamente secos.

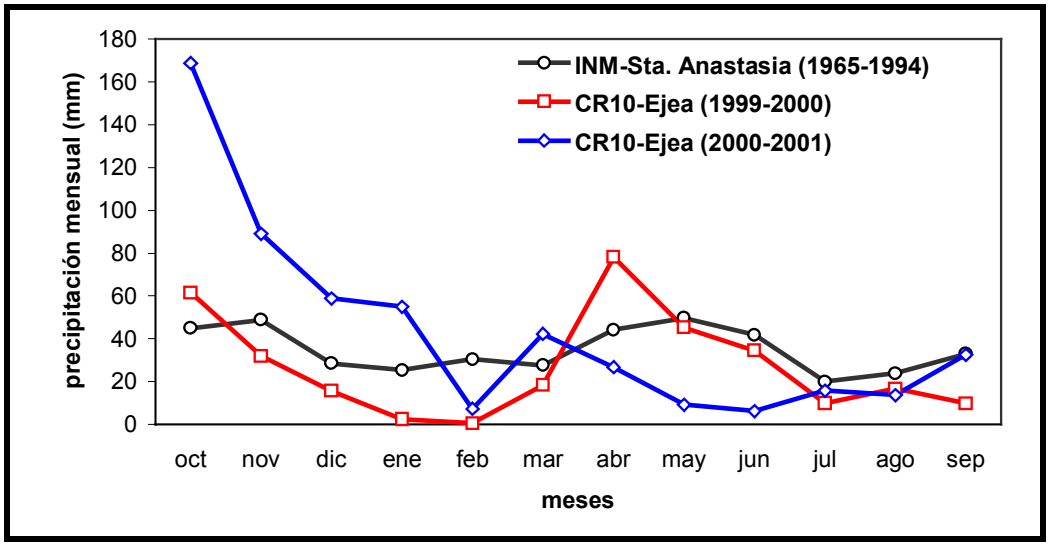


Figura 2.16. Precipitación mensual (mm). Registro histórico de la estación de Santa Anastasia (1965-1994) y registros en la estación meteorológica automática (CR10-Ejea) durante los años hidrológicos oct-99/sept-00 y oct-00/sept-01.

2.4 ESTUDIO AGRONÓMICO

2.4.1 La Comunidad de Regantes nº V

La CR-V es la más extensa de las pertenecientes a la Comunidad General de Regantes del Canal de Bardenas. Cuenta con una extensión total de 17.685 ha de las cuales 15.498 ha son de regadío (Laplaza, 1998). La CR-V está compuesta por once sectores de riego, cuya superficie oscila entre 442 ha y 2.263 ha (Tabla 2.3, Laplaza, 1998).

Con la creación de los nuevos regadíos en 1958, la tierra se repartió entre los colonos en lotes de 10 ha. En la actualidad los tamaños de parcela oscilan entre 1 y 30 ha, pertenecientes a más de 1.000 propietarios. Sin embargo el número de propietarios que se dedican exclusivamente a la agricultura es sensiblemente menor debido al escaso rendimiento económico de las pequeñas explotaciones.

Tabla 2.3. Superficies en riego de cada sector de la CR-V (Laplaza, 1998).

Sector de riego	Superficie en riego (ha)
XVIII	2.100
XIX	2.263
XXIV	855
XXV	1.156
XXVI	1.733
XXVII	442
XXVIII	1.208
XXIX	925
XXX	1.670
XXXI	1.274
XXXII	1.872
Total	**15.498**

El sistema de riego implantado es el riego por inundación en turnos aproximados de trece días. Tan sólo existen en la actualidad unas 450 ha transformadas a riego por aspersión y algunas parcelas de tomate industrial en riego por goteo.

Al objeto de conocer la eficiencia de riego a nivel de parcela, Lecina *et al.* (2001) realizaron 50 evaluaciones de riego en parcelas niveladas, en su mayoría con cultivo de alfalfa. La eficiencia de riego media fue del 53% para las parcelas situadas sobre suelos de saso y del 80% para las situadas sobre suelos de aluvial. Debido a la existencia de parcelas en peores condiciones para el riego por inundación (sin nivelación láser, con bajos caudales de riego, peor distribución geométrica, otros cultivos) la eficiencia media a nivel de parcela en la CR-V es probablemente inferior a los valores citados. Sin embargo la eficiencia para el conjunto de la CR-V es superior debido a la reutilización interna de las aguas de drenaje para el riego en una superficie apreciable de la CR-V.

2.4.1.1 Red de riego

La red de riego tiene su origen en el Canal de Bardenas desde donde parten las principales acequias que abastecen a la CR-V, la acequia de los Cascajos y la acequia del Saso (Fig. 2.17). La longitud total de las acequias en la CR-V es de 468 km (Laplaza, 1998).

Existen dos pequeños embalses, Lagunazo de Moncayuelo y Bolaso, que regulan el agua de riego dentro de la CR-V.

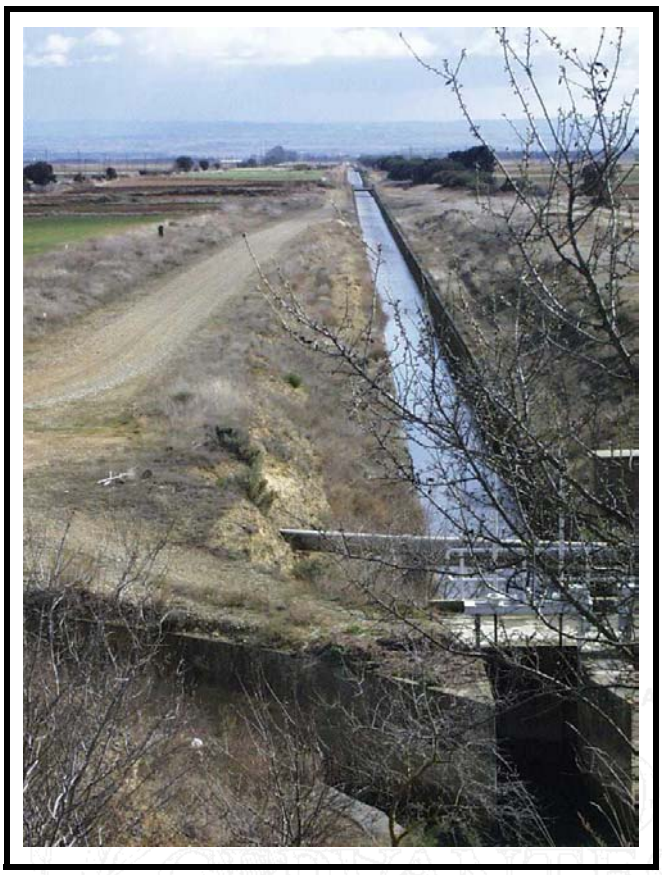


Figura 2.17. Acequia del Saso a la salida del Canal de Bardenas.

Prácticamente la totalidad de la red de riego está revestida con hormigón, presentando diferentes estados de conservación. En plena campaña de riego se pueden observar algunas de las acequias secundarias desbordadas, demostrando que su capacidad es insuficiente para cubrir las necesidades de riego actuales.

2.4.1.2 Red de drenaje

Sobre la CR-V se traza una densa red de drenaje que sigue mayoritariamente los cauces y barrancos naturales (Fig. 2.18) cumpliendo la función de evacuar las aguas de percolación y escorrentía superficial de las parcelas.

Dadas las características de los suelos es inusual la instalación de drenes subterráneos en parcela, restringiéndose únicamente a zonas con problemas de drenaje.

Atendiendo a la magnitud de los drenes, se pueden diferenciar los colectores generales, que delimitan los sectores de riego, drenes secundarios, localizados dentro de los sectores de riego, y drenes de parcela o de cintura, destinados a evacuar el agua de percolación en las parcelas dispuestas en bancales.

La nomenclatura de los colectores comienza con la letra "C" seguida de un número de orden asignado de Oeste a Este. Para los desagües secundarios comienza con la letra "D" seguida del número del sector al que pertenece expresado en números romanos.

El agua que circula por la red de drenaje de la CR-V llega principalmente hasta los ríos Riguel y Arba, siendo el primero el principal colector de la CR-V.

Para lograr un mayor aprovechamiento de los recursos hídricos, parte del agua circulante por la red de drenaje es incorporada a la red de riego mediante trasvases o suministrada directamente a parcela (especialmente en los arrozales).

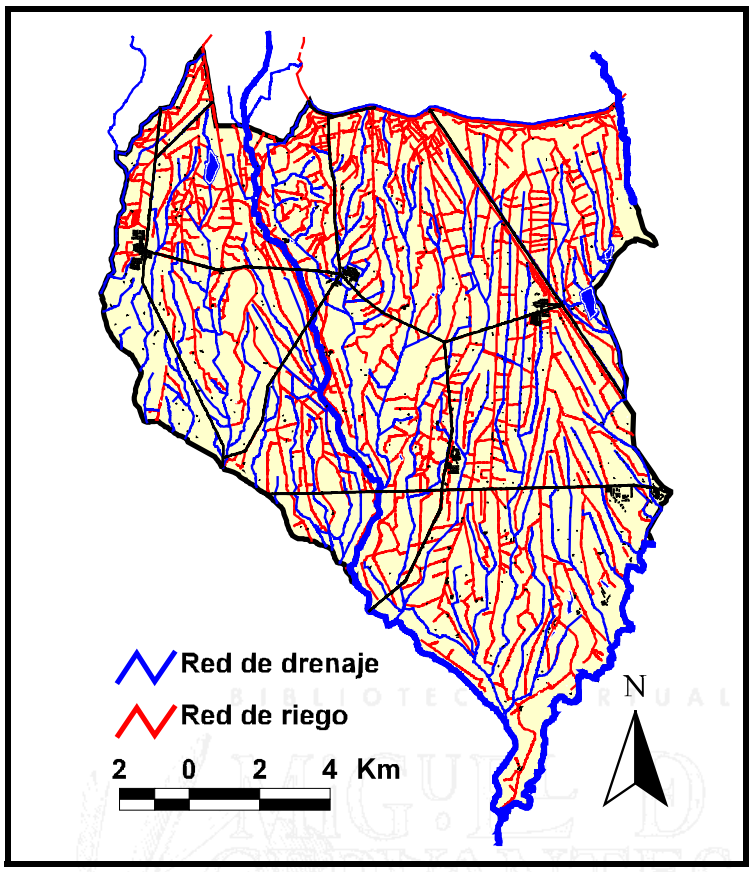


Figura 2.18. Trazado de las redes de riego y drenaje sobre la CR-V.

2.4.1.3 Distribución de cultivos

La superficie cultivada, extraída de la base de datos de la CR-V durante la campaña del año 2000 (16.065 ha) fue superior a la superficie en riego (15.498 ha) debido a la existencia de parcelas sobre las que se siembran segundas cosechas (3% de la superficie).

Durante el año 2000 (Fig. 2.19) el cultivo más extendido fue la alfalfa (31%) que, junto con el maíz (29%), ocuparon el 60% de la superficie; seguidos del cereal de invierno (13%) y del girasol (8%). La hierba destinada al consumo ganadero ovino de la zona ocupó un 5% mientras que el arroz, limitado por las condiciones geológicas de la CR-V, se cultivó en 614 ha (4%).

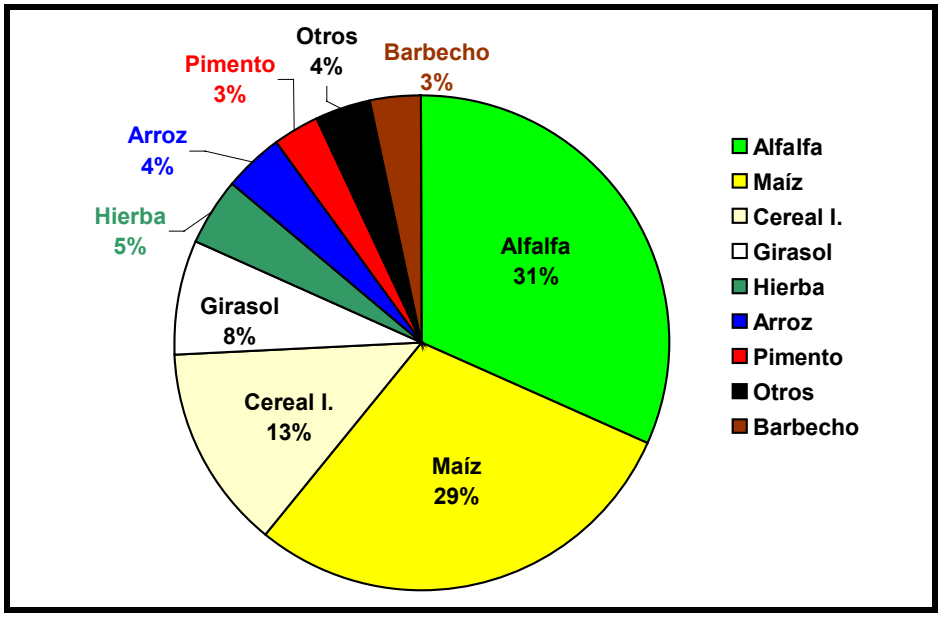


Figura 2.19. Distribución de cultivos (%) durante la campaña del 2000 en la CR-V.

El pimiento (3%) y otros cultivos minoritarios como el tomate industrial o los puerros, tienen una gran importancia económica a pesar de la escasa superficie que ocupan ya que contribuyen de forma esencial al sostenimiento económico de las pequeñas explotaciones agrarias.

Existe una variabilidad espacial en la distribución de cultivos dentro de la propia CR-V que está condicionada en gran medida por el tipo de suelo. La Figura 2.20 representa la distribución de cultivos en los sectores XXV (23% de su superficie son suelos de saso) y XXXI (100% suelos de saso).

El sector XXV, con presencia de suelos de baja permeabilidad desarrollados sobre zonas deprimidas, favorece el cultivo del arroz. La baja productividad de parte de los suelos del sector XXV (suelos en laderas y áreas deprimidas), favorece su aprovechamiento para cultivos herbáceos (9% de la superficie) destinados al ganado ovino local.

Por el contrario, el sector XXXI, compuesto únicamente por suelos de saso muy permeables, no es apto para el cultivo del arroz. Los cultivos más productivos estuvieron mucho más representados; así la proporción de maíz (45%) fue tres veces superior a la del sector XXV (15%) y se cultivó pimiento (8%), prácticamente ausente en el sector XXV.

Los porcentajes de alfalfa y cereal de invierno fueron similares en ambos sectores, mientras que el porcentaje de girasol fue mayor en el sector XXV, ya que es un cultivo tradicionalmente cultivado en las peores parcelas.

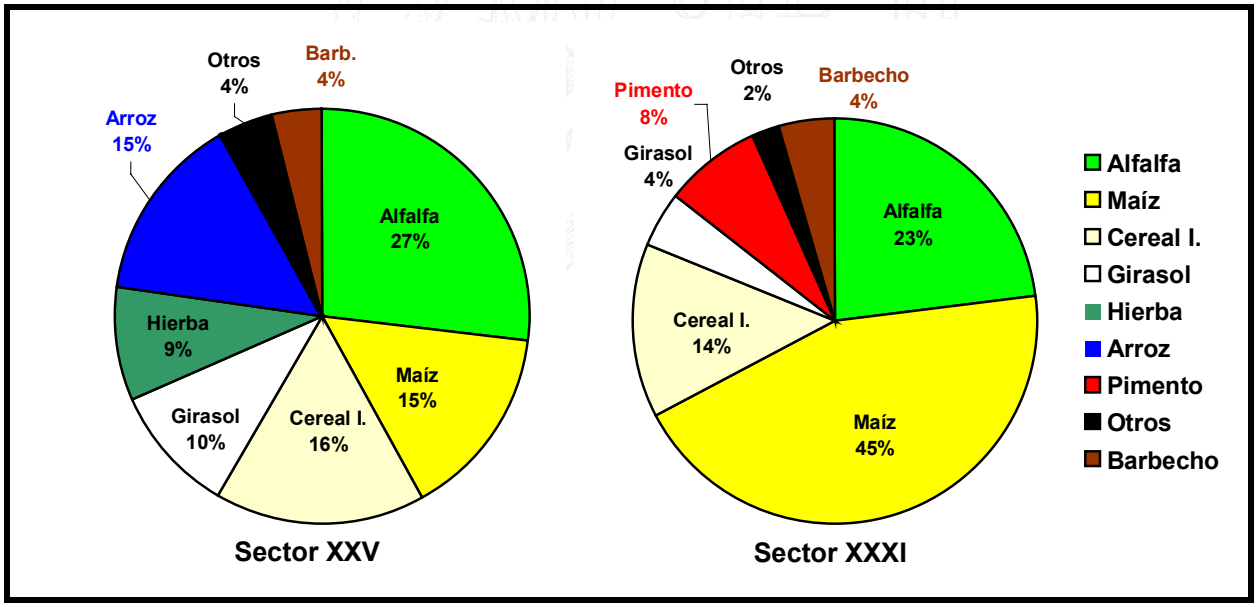


Figura 2.20. Distribución de cultivos en los sectores XXV y XXXI de la CR-V durante la campaña del 2000.

2.4.2 Prácticas agrarias y manejo agronómico de los cultivos

La información que se presenta a continuación corresponde a la campaña del año 2000 y profundiza en la fertilización nitrogenada y manejo del riego en la CR-V. La unidad de trabajo ha sido la Unidad Propietario-Riego-Cultivo (*UPRC*) que corresponde a aquellas parcelas pertenecientes a un mismo propietario, que se riegan por una misma toma de acequia y que tienen un mismo cultivo. Esta unidad es la misma que utiliza la base de datos de la CR-V destacando que puede variar de un año a otro por el cambio de una de las tres variables que la definen (propietario, riego o cultivo).

La información obtenida directamente de la base de datos de la CR-V es la relacionada con propietarios, cultivos y riego. Complementariamente se realizaron encuestas a los agricultores con el fin de conocer las prácticas agrarias y el manejo agronómico de los cultivos.

La encuesta realizada tomó como unidad la *UPRC* y se elaboraron dos cuestionarios, uno para la alfalfa y otro para el resto de cultivos (Anejo 1).

Las encuestas se distribuyeron por correo a un total de 74 agricultores de los cuales respondieron 34 lo que supone un 46% de participación (Tabla 2.4). La superficie sobre la que se dispone información es de 568 ha (3,73% de la CR-V) y corresponde a 66 *UPRC*.

Tabla 2.4. Superficie y porcentaje de cultivos en la CR-V para la campaña del 2000. Superficie encuestada, porcentaje de cultivo encuestado y número de agricultores encuestados en el año 2000 para los principales cultivos.

	CR-V		Encuesta		
	ha	%	ha	%	nº agricultores
Alfalfa	5.065	31	130	2,6	12
Maíz	4.705	29	282	6,0	24
Cereal invierno	2.130	13	54	2,5	5
Girasol	1.225	8	38	3,1	4
Hierba	728	5	14	1,9	2
Arroz	614	4	36	5,9	4
Pimiento	475	3	6	1,2	6
Otros	569	4	8	1,4	2
Barbecho	554	3	0	0	0
TOTAL	16.065	100	568	3,8	34

2.4.2.1 Alfalfa

El cultivo de la alfalfa fue el más extendido durante la campaña del 2000 ocupando 5.065 ha (31% de la superficie). El área encuestada fue de 130 ha (2,6% de la superficie de alfalfa) administrada por 12 agricultores.

Habitualmente se siembra sola a finales del verano y principios del otoño. Excepcionalmente puede sembrarse en otras fechas como finales de invierno o principios de primavera. En explotaciones ganaderas puede estar acompañada de otros cultivos como cereal o veza. El número de riegos osciló alrededor de 10, distribuidos entre marzo y septiembre.

A las alfalfas de primer año se les aplicó un abonado de sementera en forma de abonos compuestos (como el 8-15-15) aportando unos 45 kg N/ha. En alfalfas de segundo año y posteriores, la fertilización estuvo concentrada en una aplicación de distintos abonos compuestos (8-15-15, 15-15-15, 10-20-20, 8-24-12, 12-24-12) durante la primera quincena de marzo. Esta aplicación supuso un aporte medio de 45 kg N/ha. Algunos de los agricultores aplicaron otra dosis de las mismas características en junio-julio, con lo que la media de nitrógeno por hectárea se elevó a 71 kg de N/ha.

Las plagas por distintos insectos son muy habituales. Para combatirlas se utilizan insecticidas prácticamente en cada corte (Fig. 2.21). La alfalfa se siega unas 5 veces al año, se deja secar durante algunos días hasta que la humedad supera ligeramente los 30º, se rastrilla y se recoge con grandes carros que la cargan suelta (Fig. 2.21) para transportarla hasta las deshidratadoras. Actualmente son muy pocos los agricultores que mantienen la recogida en pacas; para ello, la alfalfa debe de permanecer más días extendida en el campo lo que puede suponer un corte menos y la consiguiente pérdida de producción. Las explotaciones de ganado ovino aprovechan este cultivo para el pastoreo.

La producción media de alfalfa en la CR-V fue de 13.000 kg/ha al 12% de humedad. La alfalfa es un cultivo plurianual que suele mantenerse unos 5 años, aunque la utilización de maquinaria cada vez más pesada tiende a reducir la duración del cultivo que termina con el laboreo posterior al último corte.

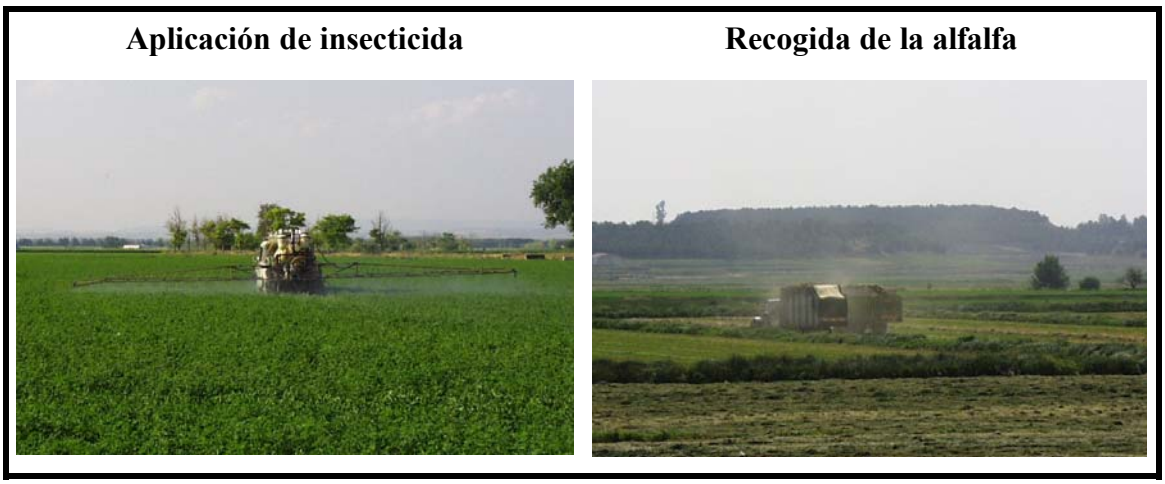


Figura 2.21. Aplicación de insecticida y recogida de la alfalfa con carros.

2.4.2.2 Maíz

El maíz fue, durante el año 2000, el segundo cultivo más extendido en la CR-V, con 4.705 ha (29% de la superficie). Se han obtenido respuestas de 24 agricultores sobre 282 ha de maíz (6,0% de la superficie cultivada de maíz).

La siembra se produjo a finales de abril y principios de mayo (Fig. 2.22). Debido a las abundantes lluvias primaverales del año 2000 se prescindió del riego de presiembra. Cuando no se dan estas condiciones climáticas es habitual efectuar un riego "de huebra" para posteriormente sembrar en condiciones de tempero. Las lluvias posteriores a la siembra del maíz provocan la aparición de costras ("encarado") que limitan la nascencia del maíz. Este problema es solucionado de forma mecánica mediante rodillos con púas o aplicando riegos continuados para mantener el suelo húmedo.

Las malas hierbas se combaten con un tratamiento de herbicidas en fechas cercanas a la siembra.

Durante el año 2000 los riegos del maíz se distribuyeron desde junio hasta septiembre aplicándose una media de 7 riegos a cada parcela.

La práctica más generalizada en la fertilización nitrogenada fue la realización de un abonado de sementera con abonos compuestos (15-15-15, 19-19-19 y 10-20-20) pocos días antes de sembrar, lo que supone un aporte medio de 123 kg N/ha. Posteriormente, en junio, se aplicó una cobertera de urea (46%) suministrando 289 kg N/ha. Minoritariamente algunos agricultores aplicaron dos coberteras durante el verano, o utilizaron otros abonos como el nitrato amónico (33%) o abonos líquidos (N32, 32%). Según la encuesta efectuada el abonado total inorgánico supuso una media de 412 kg N/ha, llegando a suministrarse fertilizaciones máximas superiores a los 500 kg N/ha.

Salvo una pequeña parte que fue recolectado en verde para abastecer ganado del propio agricultor, la práctica totalidad del maíz fue cosechado en grano mediante grandes maquinarias (Fig. 2.22). La fecha de cosecha está muy condicionada por el régimen de precipitaciones otoñales ya que influye sobre la humedad del grano y del suelo, factor esencial para el manejo de maquinaria pesada y el posterior laboreo de la parcela. Durante la campaña del 2000 y debido al lluvioso invierno la recolecta se prolongó desde octubre hasta febrero obteniéndose unos rendimientos medios de 10.200 kg/ha a 14º de humedad.

Los residuos de cosecha fueron destinados al pastoreo ovino o empacados por los agricultores que poseen ganado. Posteriormente algunos agricultores quemaron los rastrojos para favorecer el laboreo.

Figura 2.22. Siembra y cosechado del maíz.

2.4.2.3 Cereal de invierno

Los principales cultivos de cereal de invierno fueron el trigo y la cebada. Ocuparon una superficie de 2.130 ha, lo que representa algo más del 13%. La superficie encuestada fue de 54 ha (2,5% de la superficie de cereal de invierno) administradas por cinco agricultores.

La siembra del cereal de invierno se centró en los meses de noviembre y diciembre. La media de riegos durante el año 2000 fue inferior a 3, distribuyéndose entre los meses de febrero y mayo y adaptándose al régimen de precipitaciones.

Se aplicó una media de 181 kg N/ha repartidos en dos aplicaciones. 45 kg N/ha se aplicaron en forma de abonos compuestos (8-15-15, 10-20-20, y 19-19-19) unos días antes de la siembra y posteriormente a principios de la primavera se aplicó una cobertera de urea (46%) que aporta una media de 136 kg N/ha (Fig. 2.23).

El tratamiento fitosanitario en el cereal de invierno está destinado a combatir malas hierbas, para lo cual se aplicó herbicida al comienzo de la primavera.

La recogida del grano se realiza durante la primera quincena de julio mediante cosechadoras. Los resultados de la encuesta mostraron un rendimiento medio de 4.540 kg/ha.

Habitualmente la paja se suele empacar para el ganado, aunque algunos agricultores utilizaron un picador de paja en la cosechadora para favorecer el posterior laboreo.

Figura 2.23. Aplicación de fertilizantes inorgánicos al cereal de invierno.

2.4.2.4 Girasol

El girasol (Fig. 2.24) se cultivó en 1.225 ha (7,0% de la superficie) de las cuales se encuestaron 38 ha (3,1% de la superficie de girasol) pertenecientes a 4 agricultores.

Se siembra sobre el mes de mayo, aplicándole entre 5 y 6 riegos de media distribuidos de junio a agosto. La fertilización se realizó mediante un abonado de sementera con abonos compuestos (8-15-15, 10-20-20 y 19-19-19) unos días antes de la siembra con un aporte medio de 50 kg N/ha. Habitualmente se realizó otra aplicación de urea en junio aunque existen agricultores que no la realizan y otros que aplican dos coberteras (junio y julio). La media de nitrógeno aplicado fue de 152 Kg N/ha.

Se procede a la recolecta de las pipas en el mes de octubre utilizando cosechadoras. El rendimiento medio deducido de la encuesta fue de 2.000 kg/ha. Los residuos de cosecha son aprovechados por el ganado y enterrados mediante el laboreo.

Figura 2.24. Cultivo del girasol.

2.4.2.5 Principales hortalizas

Las hortalizas más comunes fueron el pimiento (475 ha), el puerro (118 ha) y el tomate industrial (98 ha). Se encuestaron un total de 14 ha (2,0% de las hortalizas cultivadas) administradas por 8 agricultores de los cuales seis de ellos cultivaron pimiento, uno puerro y otro tomate.

La abundante mano de obra necesaria para el cultivo de estas hortalizas provoca que cada agricultor maneje extensiones pequeñas (para el pimiento normalmente 1 ha). La época de siembra o plantación es la primavera y a partir de entonces hasta primeros de octubre se riegan por inundación en surcos (Fig. 2.25).

Durante la campaña del 2000, se aplicó una media de 9 riegos para el pimiento y tomate, siendo superior para el puerro (11 riegos). Algunos agricultores productores de tomate industrial han implantado en sus parcelas un sistema de riego por goteo con el cual consiguen aumentar considerablemente su rendimiento.

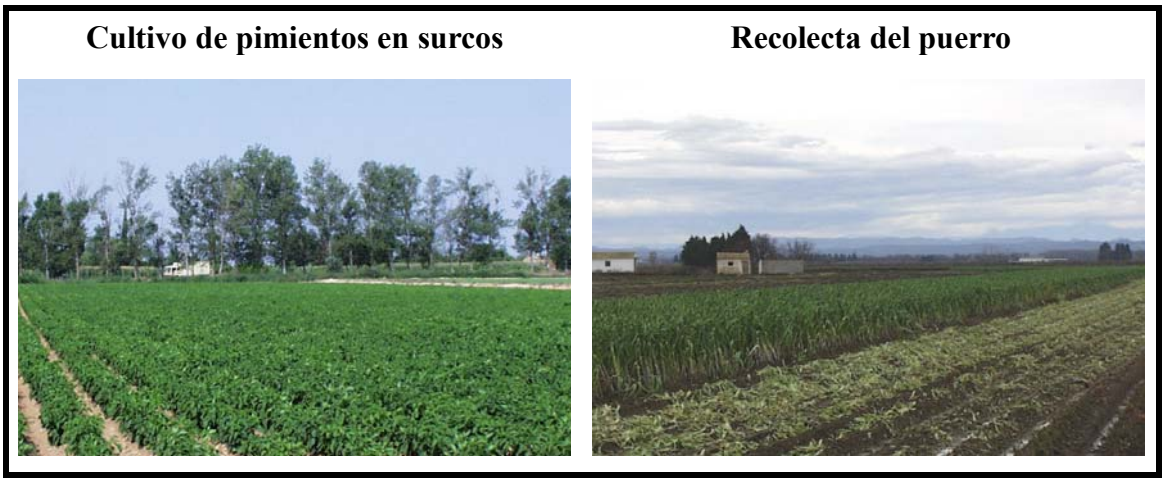


Figura 2.25. Cultivo de pimiento en surcos y recolecta del puerro.

En el pimiento se realizó un abonado de sementera mediante abonos compuestos (15-15-15, 19-19-19, 10-20-20 y 8-15-15) que aportaron una media de 129 kg N/ha y una sola cobertera en junio de urea o nitrato amónico 33% aunque hay agricultores que realizan dos coberteras. En total se aplicó una media de 394 kg N/ha.

La recolecta del pimiento y puerro se realiza de forma manual (Fig. 2.25). El tomate se recoge con cosechadora pero también requiere mucha mano de obra. La producción media de pimiento deducida de la encuesta fue de 15.000 kg/ha.

2.4.2.6 Otros cultivos

Otros cultivos extendidos en la CR-V son los herbáceos (728 ha) y el arroz (614 ha). Este último se cultiva en áreas deprimidas y está favorecido por suelos de baja permeabilidad por lo que las características geológicas de la CR-V condicionan su extensión. Se encuestaron 36 ha (5,86% de la superficie cultivada) administradas por cuatro agricultores.

El arroz permanece inundado desde finales de abril o principios de mayo, que es cuando se procede a la siembra. Las parcelas se distribuyen en bancales donde el agua puede circular escurriendo de una parcela a otra (Fig. 2.26). Es muy común que los agricultores utilicen el agua circulante por los desagües para regar los arroces ya que disponen de ella permanentemente.

La fertilización nitrogenada se redujo al abonado de presiembra, aplicándose unas dosis medias de 132 kg N/ha en forma de abonos compuestos (20-10-10, 15-15-15). No se realizó abonado de cobertera y algunos agricultores lo justificaron en el contenido de nitrato del agua de los desagües que se utiliza para el riego.

La cosecha del arroz se realiza a finales de octubre y principios de noviembre obteniéndose unos rendimientos medios según la encuesta de 6.000 Kg/ha. Los residuos de cosecha pueden ser quemados o enterrados mediante la práctica del fangueo (Fig. 2.26).

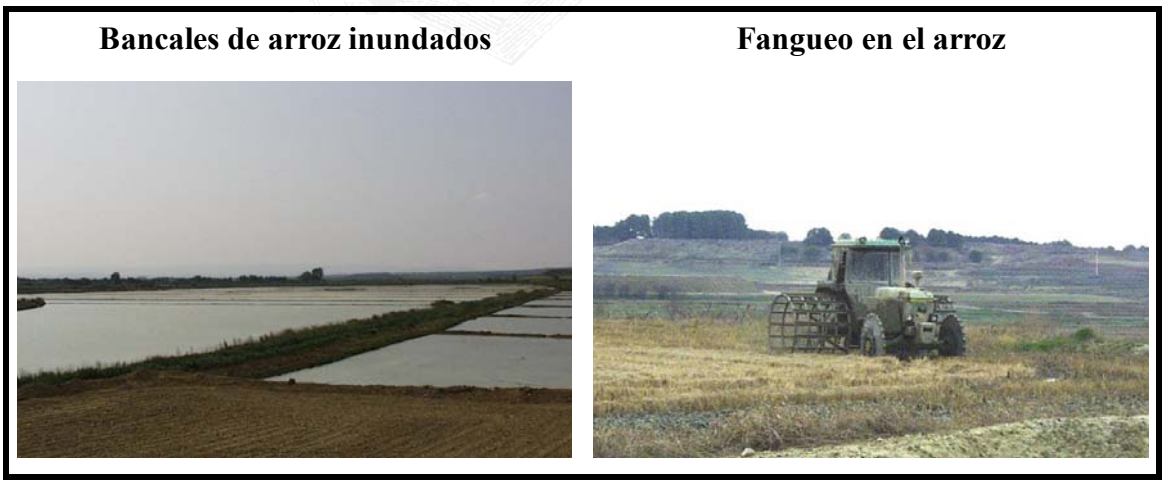


Figura 2.26. Bancales de arroz inundados y fangueo del rastrojo.

Los cultivos herbáceos se desarrollan en explotaciones ganaderas ovinas. La fertilización nitrogenada fue baja y recibieron una media de 9 riegos. En las parcelas con cultivos herbáceos se practica el pastoreo (Fig. 2.27).

Minoritariamente también se cultivaron frutales (62 ha), guisantes (41 ha), cebolla (28 ha), brócoli (16 ha), chopos (10 ha), olivos (8 ha), remolacha (7 ha), colza (7 ha), espárrago (5 ha), coliflor (5 ha), viña (2 ha), acelga (1,5 ha), calabaza (1 ha), almendro (1 ha) y alcachofa (0,75 ha).

Figura 2.27. Pastoreo sobre cultivos herbáceos.

2.4.3 Consumo de agua de riego

Para estudiar el consumo de agua de riego en la CR-V se analizaron los datos de consumo (por cultivos y sectores) en la campaña del 2000, tomados en parcela por el personal de la CR-V y los volúmenes diarios de agua servidos por Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) a la CR-V en el año hidrológico oct-99/sept-00.

2.4.3.1 Consumo de agua por cultivos

La CR-V consumió en la campaña del 2000 un total de 175 Hm^3 lo que equivale a unos 11.000 m^3/ha de media. La Figura 2.28 muestra la distribución de los consumos por cultivos.

El maíz presentó un consumo en porcentaje similar a la superficie que ocupó en la CR-V (30%) mientras que la alfalfa consumió casi la mitad del agua de riego total (44%).

El volumen de agua utilizado en el riego del pimiento (5%) y girasol (6%) fue similar al del cereal de invierno (6%) a pesar de que ocupó extensiones de terreno sensiblemente inferiores (pimiento= 475 ha, girasol= 1.225 ha, cereal invierno= 2.130 ha).

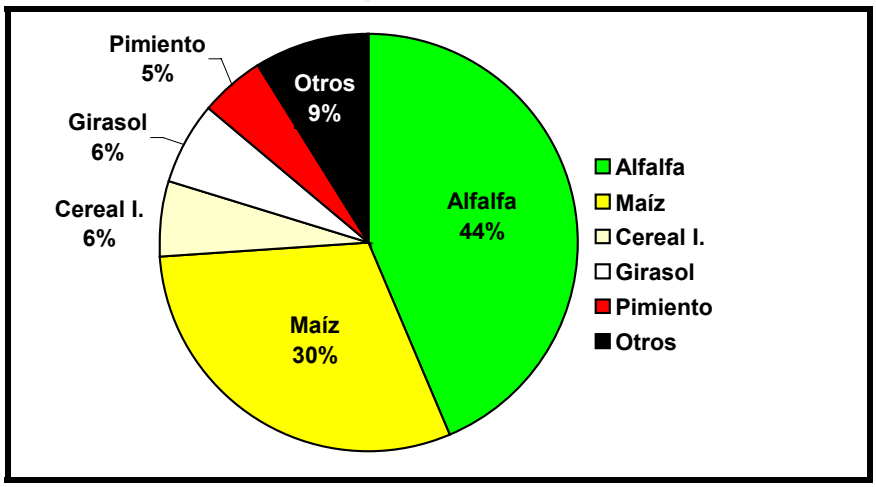


Figura 2.28. Distribución por cultivos del volumen de agua de riego consumida (% del total) en la CR-V durante la campaña del año 2000 (Base de datos de la CR-V).

La Tabla 2.5 presenta los valores medios del número de riegos aplicados, del consumo anual por hectárea y del consumo por hectárea y riego para los principales cultivos durante la campaña del año 2000. El consumo del arroz no está incluido debido a que en muchos casos se abastece directamente de los desagües, con un volumen de riego no controlado por la CR-V.

La alfalfa (mayor duración del ciclo vegetativo) y el pimiento (mayor frecuencia de riego a causa de su reducido sistema radicular) recibieron el mayor número de riegos (10 riegos), seguidos por el maíz con tres riegos menos. Los cultivos a los que menos riegos se aplicaron fueron el girasol (4 riegos) y el cereal de invierno (3 riegos).

Tabla 2.5. Valores medios de número de riegos, consumo anual por hectárea y consumo anual por hectárea y riego para la alfalfa, maíz, cereal de invierno, girasol, y pimiento.

Cultivo	nº de riegos	consumo (m^3/ha)	consumo (m^3/ha·riego)
Alfalfa	10	15.025	1.418
Maíz	7	11.308	1.590
Cereal I.	3	4.863	1.784
Girasol	4	9.050	2.103
Pimiento	10	18.363	1.905

El mayor consumo por hectárea lógicamente lo presentaron aquellos cultivos con mayor número de riegos. Entre ellos el pimiento consumió más debido al mayor volumen aplicado en cada riego.

El mayor consumo por riego correspondió al girasol favorecido por la tendencia a cultivarse en las peores parcelas y por tanto de mala nivelación. El consumo por riego de la alfalfa fue el más bajo. Este hecho se justifica por varios factores: a) las parcelas destinadas a la alfalfa se suelen nivelar con láser antes de sembrar debido a que es un cultivo plurianual b) el habitual manejo de maquinaria pesada provoca una mayor compactación del suelo y por tanto, una disminución en la capacidad de infiltración c) los riegos aplicados a finales de invierno y comienzos de primavera consumen menos agua debido a la mayor humedad del suelo.

Hubiese sido esperable un consumo por riego menor en el pimiento debido al cultivo por surcos; sin embargo el hecho de que se cultive exclusivamente sobre suelos de saso muy permeables provoca consumos medios por riego superiores al maíz y alfalfa.

2.4.3.2 Distribución temporal del consumo de agua de riego

El consumo de agua de riego no se distribuyó uniformemente a lo largo del año. La Figura 2.29 presenta los volúmenes diarios servidos a la CR-V durante el año hidrológico oct-99/sept-00 desde el Canal de Bardenas por Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE).

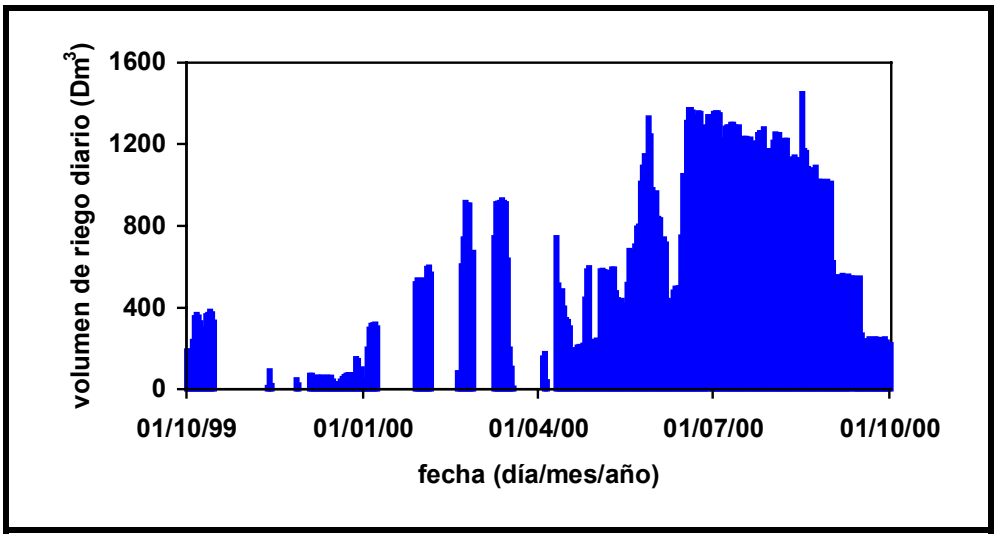


Figura 2.29. Evolución del consumo de agua de riego diario en la CR-V durante el año hidrológico oct-99/sept-00 (Confederación Hidrográfica del Ebro).

En los días finales de invierno el consumo es muy bajo o nulo. En esta época, dependiendo del régimen de precipitaciones sólo necesitó de algún riego aislado el cereal de invierno. Con la llegada de la primavera el consumo diario ascendió, intercalándose días sin consumo por efecto de las lluvias. El período de máximo consumo coincidió con el verano ya que durante esta estación necesitan del riego todos los cultivos de la CR-V a excepción del cereal de invierno.

De todos los riegos aplicados a cada cultivo, el primero es el que más agua consume ya que con el laboreo el suelo incrementa sensiblemente su capacidad de infiltración. La compactación del suelo tras este primer riego disminuyó el volumen de agua aplicado en riegos posteriores.

2.4.3.3 Distribución espacial del consumo de agua de riego

La distribución del consumo de agua de riego en la CR-V a lo largo del período estudiado no fue uniforme. La Figura 2.30 presenta los consumos por hectárea en los trece sectores durante la campaña del año 2000.

Los mayores consumos se presentaron en los sectores con suelos más permeables (sectores XXX, XXVIII, XXXI) sobre los que se desarrollaron mayoritariamente cultivos con necesidades de riego más altas (maíz, alfalfa y hortalizas). El máximo se presentó en el sector XXX (1.608 mm) atribuido esencialmente a las llamadas "tomas altas" que presentan bajo caudal y a las malas infraestructuras de riego (algunas acequias son de tierra y las parcelas no presentan nivelación láser).

Los sectores con menor consumo fueron aquéllos con mayor porcentaje de suelos de baja permeabilidad. En ellos son más frecuentes los cultivos con menores necesidades de riego (girasol y cereal de invierno). El cultivo del arroz favorecido por los suelos de estos sectores no eleva la media del sector debido a que mayoritariamente son abastecidos desde los desagües y este volumen de agua no ha sido contabilizado. La reutilización de agua, no contabilizada, contribuye al descenso del consumo medio de los sectores con mayor aprovechamiento del agua de los desagües (sectores XVIII, XIX, XXIV y XXV).

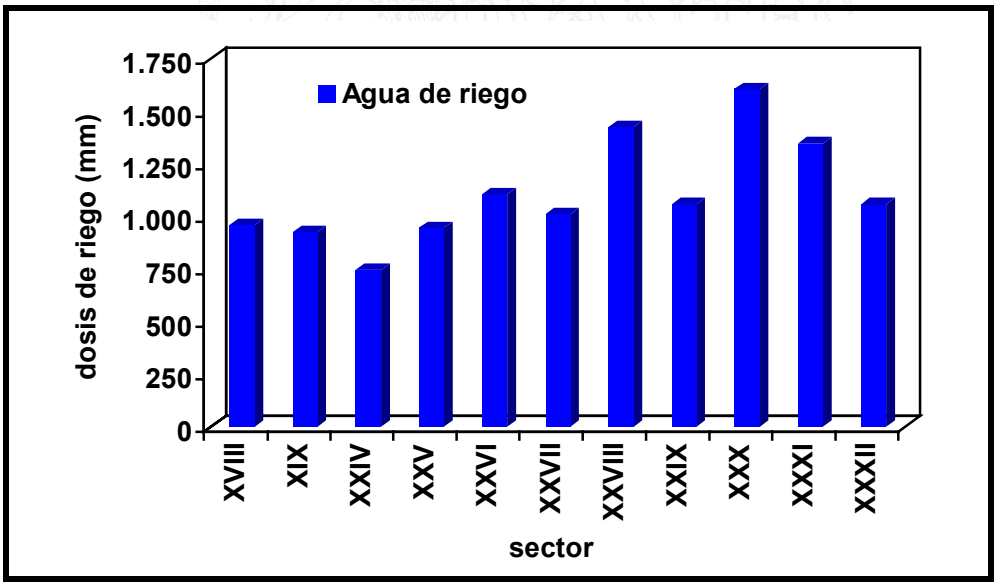


Figura 2.30. Dosis anuales de riego (mm) en los once sectores de la CR-V durante la campaña del 2000.

2.4.4 Fertilización nitrogenada

En este apartado se analiza el manejo de la fertilización nitrogenada en la CR-V, las dosis aplicadas en los principales cultivos, así como su distribución temporal.

2.4.4.1 Fertilización nitrogenada orgánica

El abonado orgánico no es habitual ya que es practicado fundamentalmente por aquellos agricultores que comparten actividad agrícola y ganadera. Los principales abonos orgánicos utilizados son los procedentes de los residuos ganaderos de la zona. En la comarca están muy desarrolladas las explotaciones porcinas y ovinas que producen purín y estiércol que posteriormente son aplicados a los cultivos.

Los residuos ganaderos se aplican en invierno y su dosis está muy condicionada por la cantidad de residuo ganadero de que disponga el agricultor (Fig. 2.31). A menudo la aplicación de purín está más condicionada por la necesidad de deshacerse del residuo ganadero que por el hecho de favorecer la fertilización nitrogenada del cultivo, lo que provoca dosis excesivas.

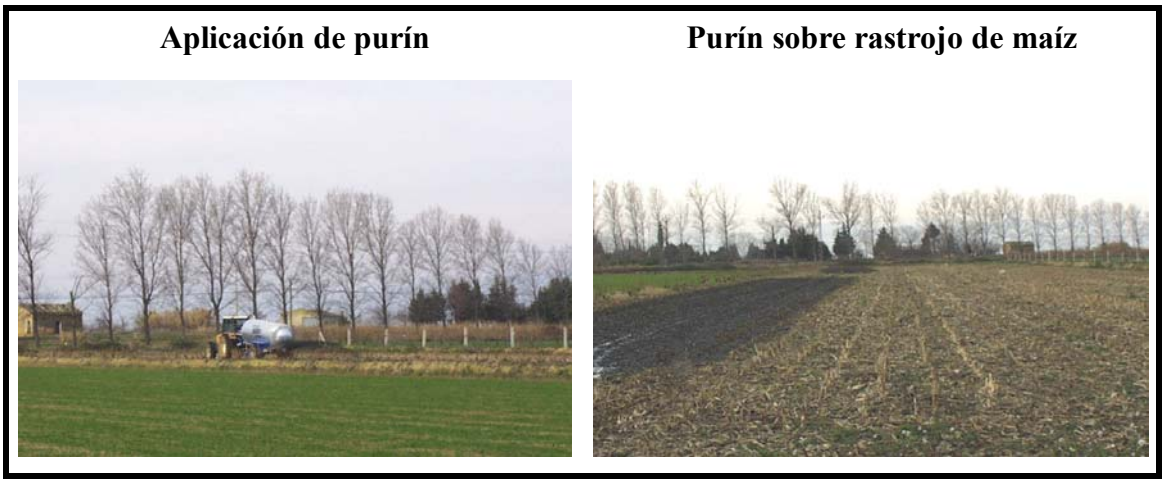


Figura 2.31. Aplicación de purín sobre rastrojo de maíz.

2.4.4.2 Fertilización nitrogenada inorgánica

La práctica más común llevada a cabo por los agricultores de la CR-V es la fertilización nitrogenada mediante fertilizantes sólidos inorgánicos. Tan solo un 4% de los agricultores encuestados utilizan abonos líquidos (fundamentalmente N32).

La Figura 2.32 representa las dosis de nitrógeno totales aplicadas a los principales cultivos, distinguiéndose entre la cantidad aplicada en sementera y en las diferentes coberteras. Las mayores dosis de nitrógeno se aplican al maíz (412 kg/ha) seguidas muy de cerca por las hortalizas y en particular por el pimiento (394 kg/ha). Sensiblemente más bajas son las dosis aplicadas al cereal de invierno, girasol y arroz (181, 152, y 132 kg/ha respectivamente) y muy inferiores las dosis de las alfalfas (71 kg/ha).

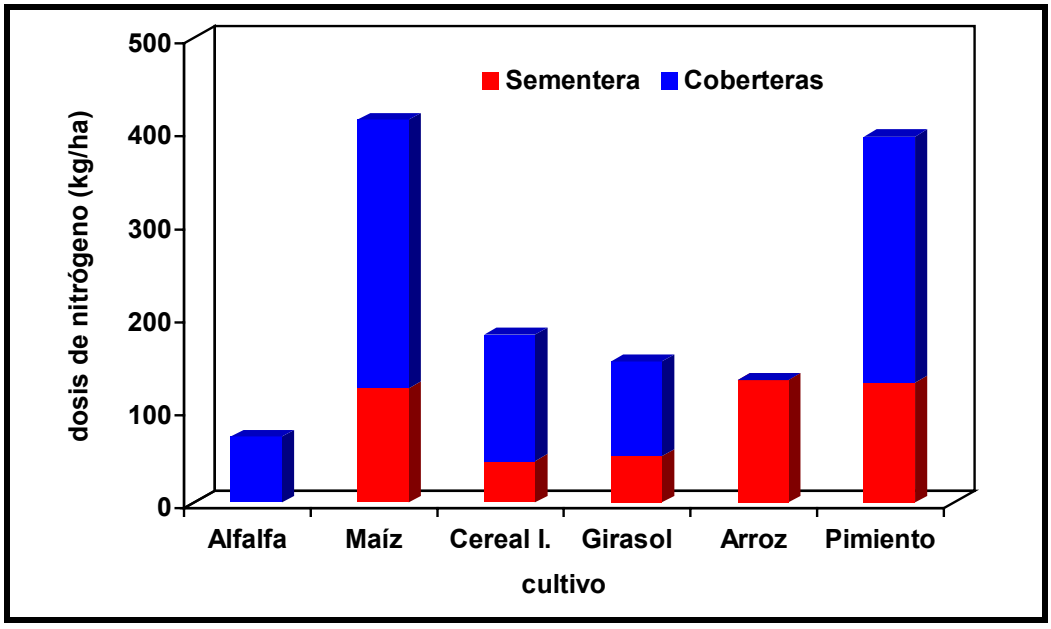


Figura 2.32. Dosis de nitrógeno aplicada a los principales cultivos diferenciando el aplicado en sementera y cobertera.

La alfalfa, el maíz, el cereal de invierno, el girasol, el arroz y el pimiento ocuparon la práctica totalidad (90%) de la superficie cultivada. El nitrógeno anual aplicado en la fertilización inorgánica de estos cultivos para toda la CR-V, resultado del producto de las dosis

medias por la superficie de cada cultivo, ascendió a 3.138 t. En cuanto a su distribución (Fig. 2.33) más de la mitad, un 62%, se aplicó al maíz, un 12% al cereal de invierno, un 11% a la alfalfa, un 6% al girasol y pimiento y, finalmente, un 3% al arroz.

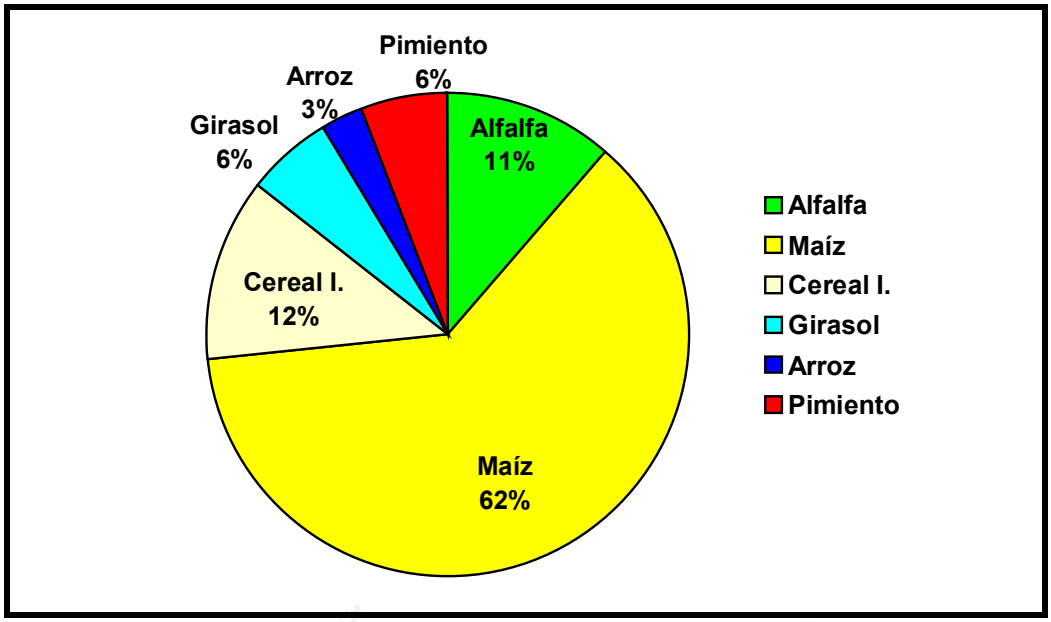


Figura 2.33. Contribución de los principales cultivos a la cantidad de nitrógeno aplicado mediante fertilización inorgánica en la CR-V durante la campaña del 2000.

Como se ha estudiado en el apartado de prácticas agrarias, la distribución y dosis en las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados varían dependiendo de los cultivos. La Figura 2.34 presenta la masa de nitrógeno diaria aplicada por períodos de quince días (t) en toda la CR-V durante la campaña del año 2000.

Las mayores cantidades de nitrógeno se aplicaron durante la primera quincena de junio (750 toneladas diarias) correspondiendo principalmente al abonado de cobertera del maíz.

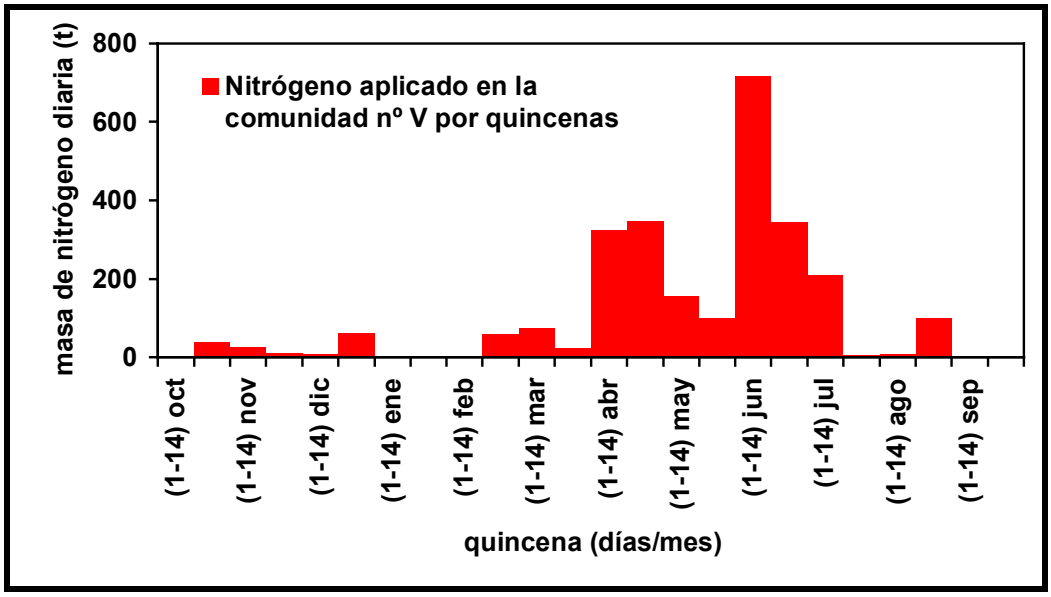


Figura 2.34. Masa de nitrógeno diaria (t) aplicada quincenalmente en la CR-V durante la campaña de 2000.

En las dos quincenas del mes de abril se alcanzaron valores superiores a las 300 toneladas diarias debido a que es en esta época cuando se produjeron los abonados de sementera del maíz, girasol, hortalizas y arroz. El nitrógeno suministrado a comienzos de la primavera correspondió fundamentalmente a los abonados de cobertera de la alfalfa y de los

cereales de invierno. Las cantidades aplicadas a comienzos del invierno se debieron al abonado de sementera del trigo y la cebada.

Al objeto de valorar la fertilización realizada al maíz, cereal de invierno, girasol y arroz, la Figura 2.35 compara el nitrógeno aplicado mediante fertilización (obtenido dividiendo la cantidad media de N aplicado por la producción) frente al nitrógeno extraído por el cultivo tomado de Domínguez (1997).

Las dosis de nitrógeno aplicado mediante abonos al cereal de invierno, girasol y maíz fueron superiores al nitrógeno extraído por estos cultivos. Al cereal de invierno se le aplicaron dosis superiores en un 60% al nitrógeno extraído, mientras que en el caso del girasol y maíz las dosis aplicadas fueron un 52 y un 43% superiores a las extracciones respectivas.

Para el arroz la aportación de nitrógeno mediante fertilización nitrogenada estuvo equilibrada con la cantidad de nitrógeno extraído por el cultivo.

El consumo de nitrógeno de la alfalfa debería de proceder de su propia fijación simbiótica, con lo cual no necesita la aplicación de nitrógeno mineral que se realiza.

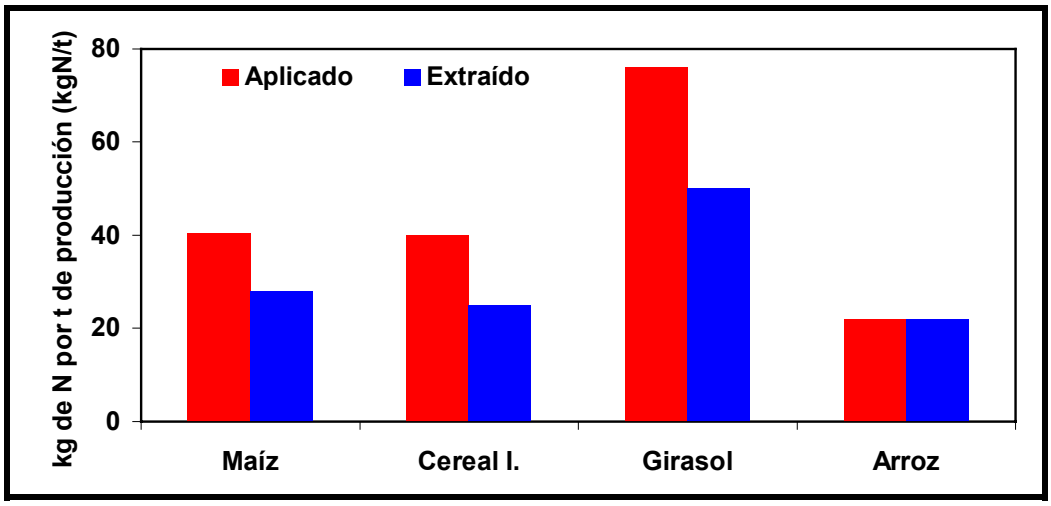


Figura 2.35. Nitrógeno aplicado (kg N/t) y extraído (kg N/t) para maíz, cereal de invierno, girasol y arroz (Domínguez, 1997).

Se debe tener en cuenta que el nitrógeno acumulado en el suelo siempre contribuye a la fertilización nitrogenada de la planta y que no todo el nitrógeno aplicado mediante fertilización es aprovechado por las plantas; por ello, conocer a priori las necesidades de fertilización nitrogenada de los cultivos requiere conocer la cantidad de nitrógeno inicial del suelo y estimar el grado de aprovechamiento de este nitrógeno y del aplicado en los fertilizantes. Igualmente, el aporte de nitrógeno en el agua de riego es un factor importante, especialmente en aquellas parcelas que utilizan para el riego el agua de drenaje.

3. LAS AGUAS SUPERFICIALES

3.1 INTRODUCCIÓN

Sobre la CR-V se traza una densa red de drenaje encargada de evacuar los flujos de retorno del regadío hacia los cursos fluviales de la zona (principalmente a los ríos Riguel y Arba). El valor ecológico tanto del río Riguel (principal colector) como de los desagües de la CR-V no es alto; sin embargo, sirven frecuentemente como abrevadero de la fauna salvaje y del ganado ovino de la zona.

El área regable de Bardenas I en la que se incluye la CR-V ha sido objeto de estudios anteriores relacionados con la salinización de las aguas superficiales inducida por el riego. Basso *et al.* (1990) con datos recogidos durante un año hidrológico calcularon que las aguas de retorno de los regadíos de Bardenas I aportaron hacia los ríos receptores unas 273.000 toneladas de sales, equivalentes a 6 t por ha regada y año. En este mismo estudio se estimó que la contribución de la red de drenaje a la salinización del río Arba fue casi del 50%.

Las aguas del Riguel llegan al Arba y finalmente se mezclan con las del Ebro en Gallur (Zaragoza), afectando por tanto a la calidad del curso medio y bajo de este río. Quílez (1998) analizó la tendencia de salinidad del Ebro concluyendo que los aumentos de salinidad del Ebro, son bajos en la cabecera del río (< 5 mg/L/año) aumentando en el tramo medio hasta 30 mg/L y año y disminuyendo en la parte baja del río (< de 15 mg/L/año).

La salinidad de los retornos del regadío está relacionada con su caudal. Así, Harker (1983) en un estudio realizado en Alberta, Canadá, muestra una relación inversa entre caudal y concentración salina en los efluentes de riego y señala que el impacto de estos retornos sobre la calidad del río receptor era mayor cuando el caudal del río era bajo.

La calidad de los retornos de riego está en función de la proporción entre escorrentía superficial y subterránea que posean. Cain (1985) señala la diferencia en la concentración salina de las aguas de retorno de dos áreas de riego en Colorado, USA. En la primera la conductividad eléctrica fue 6 veces mayor que la del agua de riego aplicada, mientras que en la segunda fue solamente de 1,5 veces más. La razón de esta diferencia fue que en el primer caso los flujos de retorno del regadío eran principalmente flujos subterráneos en los que las sales disueltas estaban concentradas por la evapotranspiración de los cultivos y tenían un mayor contacto con los minerales solubles del suelo. Por el contrario, el agua de escorrentía superficial, predominante en el segundo caso, era de menor concentración debido al menor tiempo de contacto con los materiales solubles del suelo.

La variabilidad temporal en la salinidad de las aguas superficiales está muy condicionada por el manejo del riego. Miller *et al*. (1978) afirman que las diferencias encontradas en la calidad del agua de retorno de cuatro áreas regadas en Nevada, USA, para dos estaciones de riego se debieron en parte a cambios en la cantidad del agua de riego aplicada, puesto que la masa de sales exportada hacia los ríos es una variable que depende de la concentración y del volumen. Quílez (1998) efectúa una estimación del impacto potencial de los nuevos regadíos de Monegros II concluyendo que el desarrollo de estos regadíos mediante un manejo eficiente del riego produciría un impacto medioambiental moderado mientras que bajo condiciones de manejo ineficiente del riego el impacto podría ser mucho más severo.

Los efectos del manejo del riego sobre la salinidad también se han estudiado mediante modelos de simulación. Oster y Rhoades (1975) aplicaron un modelo de simulación en el cual evidenciaron que un descenso en la fracción de lavado eleva la salinidad del suelo en la zona radicular pero reduce la emisión de sales por el agua de drenaje. Igualmente, Quílez *et al.* (1987), utilizaron un modelo calibrado y verificado en el polígono de riego de La Violada y efectuaron dos simulaciones en las que se suponen reducciones hipotéticas en el volumen de agua de riego aplicada del 20 y 40%. Observaron que el descenso en el volumen de las aguas de drenaje subsuperficial (consecuencia de una mayor eficiencia en el riego) haría disminuir la masa total de sales exportada en un 28 y un 58% respectivamente. La presencia de yeso en exceso condicionaría que la concentración salina de los efluentes fuese prácticamente

constante, por lo que la reducción del volumen de agua de riego aplicado conduciría a una disminución de la masa de sales en las aguas de retorno. La simulación de la reducción del volumen de riego en un 40% estimó una emisión de sales de 9,4 t/ha/año, cifra sensiblemente inferior a las 21 t/ha emitidas por el polígono en el año 1.983.

Los flujos de drenaje que llegan a las aguas superficiales son los portadores del nitrato lixiviado en los suelos agrícolas, que depende en gran medida de las dosis de abonado y riego. Saad (1999) realizó un estudio durante dos años en lisímetros con cultivo de maíz en el que aplicó tratamientos con diferentes dosis de riego y abonado en suelos con distinta profundidad. En su estudio no encontró diferencias significativas sobre la producción, pero afirma sin embargo que el riego y el abonado en dosis excesivas incrementó el lixiviado del nitrato y que su efecto es más importante cuanto menor es la profundidad del suelo y en los riegos inmediatamente posteriores a la aplicación del fertilizante nitrogenado.

No obstante, en el lixiviado del nitrato intervienen otros muchos factores, como son el fraccionamiento de la dosis, el método de aplicación de abonado, el uso de enmiendas, la presencia de vegetación en el suelo, el tipo de suelo y cultivo, tipo de drenaje, la altura de la capa freática, cantidad y distribución de la precipitación, etc. (Ramos y Ocio 1993). Así, Bower y Wilcox (1969) en un estudio con datos de más de 30 años, no detectaron un aumento en la masa o concentración de nitrato en las aguas superficiales de la cuenca alta del río Grande (USA) a pesar de aumentos del orden de 35 a 100 veces en el uso de fertilizantes nitrogenados.

El fraccionamiento de las dosis según las necesidades de los cultivos puede evitar gran parte del lixiviado del nitrato. Baker (1990) cita el caso de un área de regadío en Minesota, USA, donde el nitrógeno fue aplicado en cuatro veces, reduciéndose su pérdida en las aguas de drenaje en un 79% en comparación con una única aplicación.

Sobre el cauce del río Riguel, principal eje colector de los retornos del riego de la CR-V, se levantan numerosos azudes con el fin de derivar el agua para su uso en los regadíos tradicionales. Asimismo, a finales de los años ochenta y coincidiendo con los primeros problemas de falta de agua, la CR-V inicia una política basada en la reutilización para el riego del agua circulante por los desagües.

Diversos autores han estudiado la reutilización de las aguas de drenaje. Rhoades *et al.* (1989) recomiendan un sistema de manejo basado en la rotación de cultivos y aguas más o menos salinas, donde los cultivos más sensibles a la salinidad serían regados con aguas de menor calidad mientras que para los más tolerantes se aplicarían aguas más salinas. Quílez *et al.* (1987) estudiaron el efecto que la reutilización de las aguas de drenaje para el riego supondría en el polígono de riego de La Violada (Huesca). Efectuaron una simulación en la que el 25% del agua de riego provenía de la reutilización de los retornos. El resultado obtenido fue un descenso del 30% en la masa de sales exportada.

Objetivos

Este capítulo pretende realizar un análisis de la evolución espacial y temporal de la concentración de sales y nitrato tanto de la red de drenaje como del propio río Riguel a su paso por la CR-V. Sus objetivos específicos son:

- ✓ Conocer la calidad de las aguas superficiales que discurren por la CR-V.
- ✓ Identificar aquellas zonas y períodos más problemáticos.
- ✓ Analizar los principales factores condicionantes de la calidad de los flujos de retorno del regadío (suelo, riego, fertilización).
- ✓ Estudiar el efecto que produce el modelo de agricultura desarrollado en la CR-V sobre las aguas del río Riguel.
- ✓ Valorar la reutilización de las aguas superficiales para su uso agrícola.

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

Para el estudio de la calidad de las aguas de drenaje se seleccionaron un total de 28 desagües independientes, de tal forma que el área drenada por ellos comprendiera la práctica totalidad de la CR-V (Fig. 3.1). En cada desagüe seleccionado se situó un punto de muestreo cercano a su desembocadura.

A lo largo del río Riguel se seleccionaron 8 puntos de muestreo procurando mantener la mayor equidistancia posible entre ellos (Fig. 3.1). El primero se situó en Sádaba (cabecera del río al inicio del área regable) y el último en la estación de aforos R-EST, próxima a la confluencia con el Arba de Luesia.

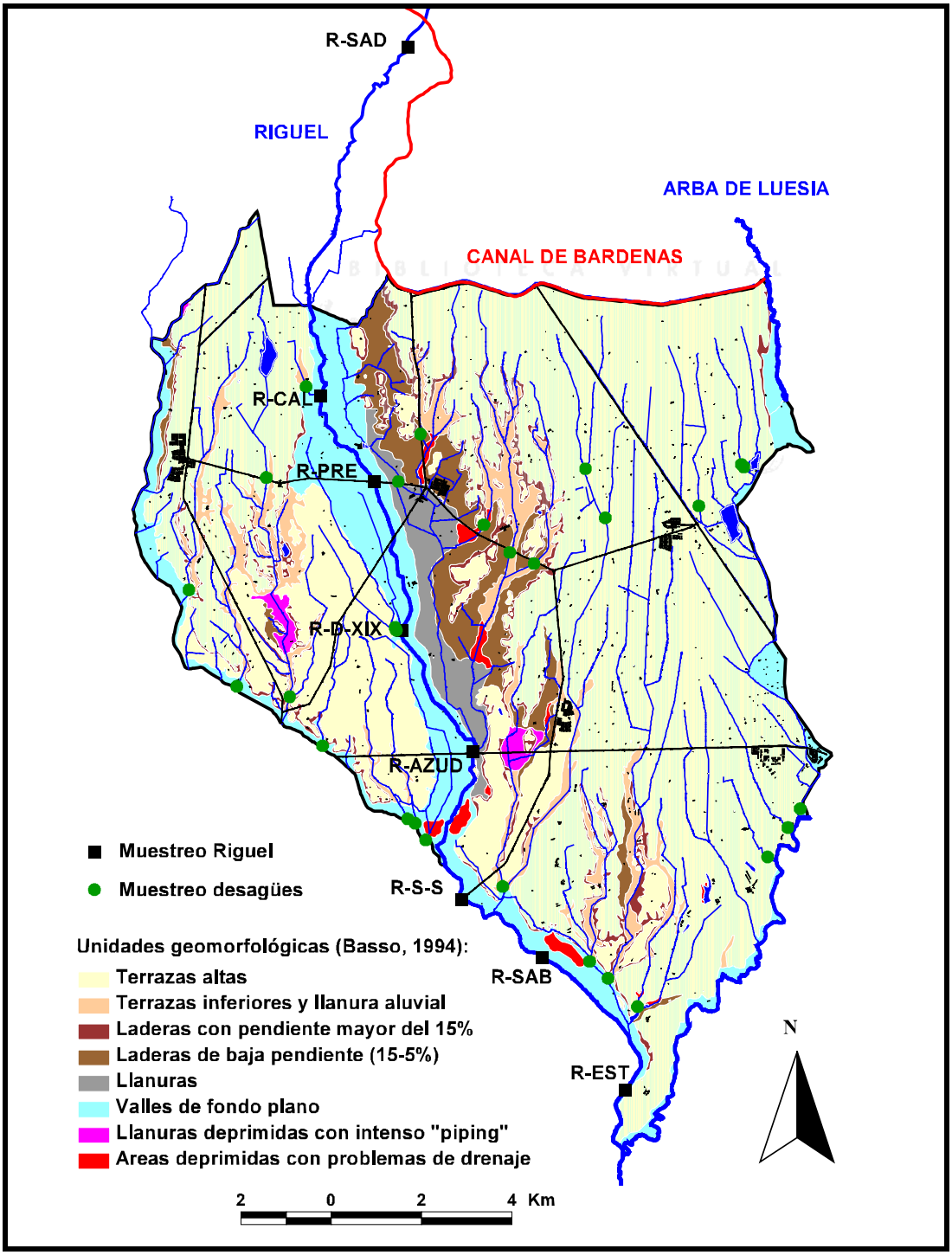


Figura 3.1. Cartografía de suelos (Basso, 1994) con la situación de los puntos de muestreo de la red de drenaje (28 puntos) y del río Riguel (8 puntos). Muestreos efectuados durante el año hidrológico oct-99/sept-00.

El muestreo se realizó durante el año hidrológico oct-99/sept-00, período en el cual se recogieron manualmente (Fig. 3.2) un total de 504 muestras de agua distribuidas en catorce muestreos. La periodicidad de los muestreos fue mensual, intensificándose (periodicidad quincenal) en los meses de mayor fertilización nitrogenada (junio y julio).

Figura 3.2. Muestreo manual de la red de desagües de la CR-V.

El día posterior a cada muestreo se determinó en laboratorio la conductividad eléctrica a 25ºC (*CE*) y la concentración de nitrato ($[NO_3^-]$). Para ello se utilizó un conductímetro ORION 1.230 y un cromatógrafo iónico DIONEX 2.000-ISP con supresión química (Fig. 3.3).

Conductímetro ORION 1.230	**Cromatógrafo iónico DIONEX 2.000-ISP**

Figura 3.3. Conductímetro y cromatógrafo iónico con supresión química.

Para el análisis de los datos se han utilizado análisis Cluster. Con este nombre se denomina un conjunto de técnicas estadísticas multivariantes cuyo propósito es agrupar objetos basándose en sus características. La aplicación de estas técnicas se ve favorecida con la utilización de herramientas informáticas.

Los análisis Cluster se han realizado con los datos estandarizados y utilizando como medida de similitud la distancia euclidiana al cuadrado. El procedimiento para la obtención de conglomerados jerárquicos ha sido el método Ward, en el que la distancia entre dos conglomerados es la suma de los cuadrados de los dos conglomerados sumados para todas las

variables. Este procedimiento tiende a combinar los conglomerados con un número reducido de observaciones, estando sesgado hacia la obtención de conglomerados con aproximadamente el mismo número de observaciones.

Los volúmenes de riego diarios suministrados a la CR-V por el Canal de Bardenas (utilizados en el análisis Cluster) han sido facilitados por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE).

La masa de sales y nitrato exportada se calculó para el punto R-EST (último punto de muestreo en el Riguel, un kilómetro aguas arriba de su desembocadura en el Arba). El caudal del Riguel en este punto se estimó a partir del caudal del Arba en Tauste, medido por la CHE en el período de estudio, y de las ecuaciones de regresión para los períodos de riego y no riego obtenidas entre los caudales medidos del Arba en Tauste y del Riguel en R-EST entre los días 7 de abril de 1992 y 7 de octubre de 1994 (período en que estuvo en funcionamiento la estación de aforos de R-EST). Estas ecuaciones de regresión, ambas significativas ($p<0,05$), son:

$$Q_{R-Est} = 1,38 + 0,34 \cdot Q_{Tauste},\ r^2 = 0,67 \text{ (período de no riego)}$$
$$Q_{R-Est} = 3,30 + 0,31 \cdot Q_{Tauste},\ r^2 = 0,59 \text{ (período de riego)}$$

donde Q es el caudal (m^3/s) de la estación respectiva. La *CE* se convirtió a sólidos disueltos totales (*TDS*) utilizando la ecuación:

$$TDS \text{ (mg/L)} = 89 + 682 \cdot CE \text{ (dS/m a 25ºC)},\ r^2 = 0,98,$$

obtenida para el conjunto de muestras recogidas en el Riguel. La masa total de sales y nitrato para cada uno de los días de muestreo se calculó, respectivamente, como el producto de *TDS* y $[NO_3^-]$ por el caudal medio diario.

3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1 Calidad de las aguas de la red de drenaje

El número total de muestras analizadas procedentes de los 28 desagües muestreados en el año hidrológico oct-99/sept-00 fue de 392. Los histogramas de frecuencias de la *CE* y [NO_3^-] (Figs. 3.4 y 3.5) muestran su aproximación a distribuciones normales sesgadas hacia valores de *CE* y [NO_3^-] bajos, consecuencia de la mayor superficie de suelos de saso existente en la CR-V y de la intensificación del muestreo en época de riego (circunstancias que como se verá posteriormente contribuyen a que existan valores bajos de *CE* y [NO_3^-]).

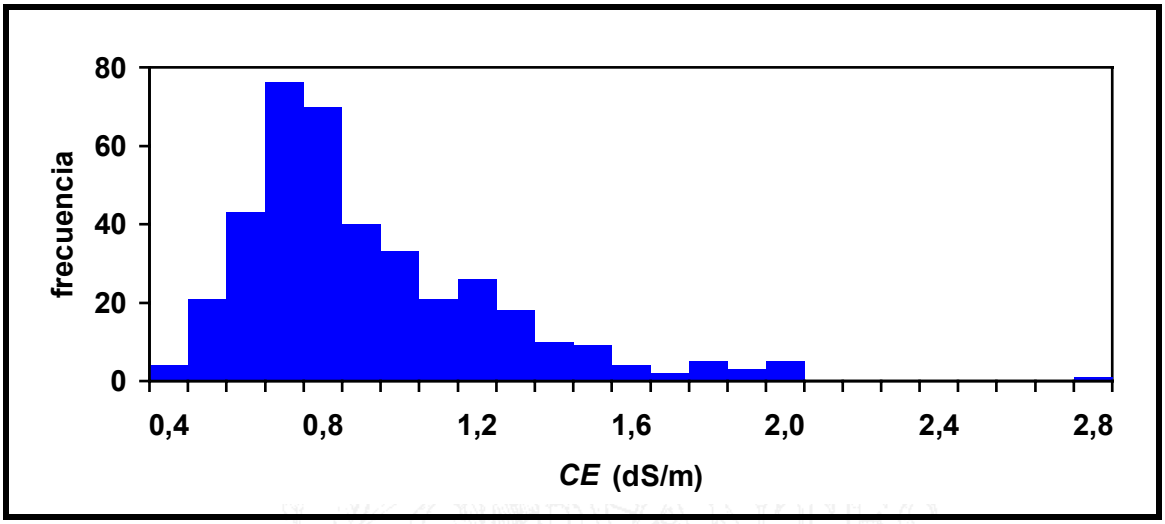


Figura 3.4. Histograma de frecuencias de la *CE* (dS/m), para las 392 muestras de agua recogidas en la red de drenaje de la CR-V durante el año hidrológico oct-99/sept-00.

El límite inferior de las distribuciones está condicionado por el agua de riego del Canal de Bardenas (*CE*=0,3 dS/m; [NO_3^-]< 2 mg/L) lo que significa que en algún momento la práctica totalidad del agua circulante por un desagüe puede ser agua de riego.

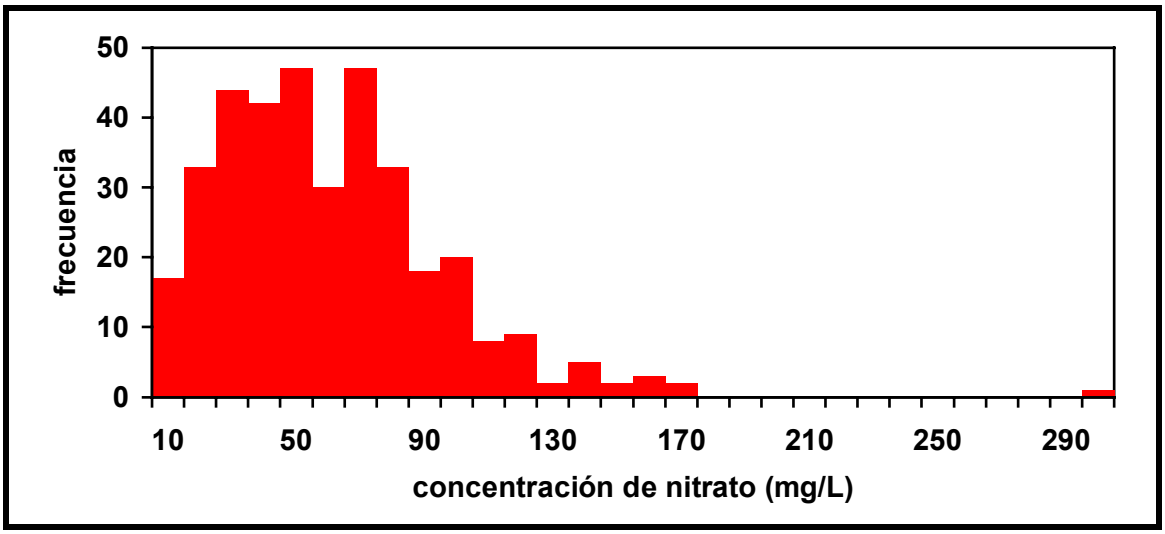


Figura 3.5. Histograma de frecuencias de la [NO_3^-] para las 392 muestras de agua recogidas en la red de drenaje de la CR-V durante el año hidrológico oct-99/sept-00.

Tan sólo una cuarta parte de las muestras analizadas presentó *CE* mayores de 1 dS/m (cuartil 75= 1,03 dS/m) y solamente una muestra supera los 2 dS/m.

En cuanto a la [NO_3^-], la mitad de las muestras presentó concentraciones superiores al límite considerado por la legislación como perjudicial para la salud (mediana= 49 mg/L). Todas las muestras excepto una, presentaron [NO_3^-] entre 0 y 170 mg/L (Fig. 3.5).

La Tabla 3.1 presenta la media, desviación típica, coeficiente de variación, máximo y mínimo de las 392 muestras de los 28 desagües en las catorce fechas de muestreo. La *CE* media fue baja (0,87 dS/m) mientras que la [NO_3^-] media superó el límite sanitario de los 50 mg/L (55 mg/L). La variabilidad en la [NO_3^-] (*CV*= 63%) fue muy superior a la variabilidad de la *CE* (*CV*= 38%) debido a que el rango de variación de la [NO_3^-] en las aguas que llegan a los desagües es mucho mayor que el rango de variación de la *CE*, que es generalmente bajo.

El valor máximo de [NO_3^-] (300 mg/L) se presentó en D-XVIII-9 en el muestreo de 16-11-99. Este valor, tan anómalo dentro de toda la muestra, se supone causado por el vertido de purín directamente sobre el desagüe. Si exceptuamos esta muestra, el valor máximo de [NO_3^-] (164 mg/L) se presentó en D-XIX-11 el 17-3-00. El 18-5-00 se presentó el valor mínimo de [NO_3^-] (1 mg/L) en D-XIX-11, consecuencia de la dilución del agua del desagüe por vertido directo de agua de riego.

Tabla 3.1. Media, desviación típica, coeficiente de variación (*CV*), máximo y mínimo de *CE* y [NO_3^-] en las muestras de agua tomadas en 28 desagües independientes de la CR-V durante el año hidrológico oct-99/sept-00.

	media	*desv. típica*	*CV (%)*	*máximo*	*mínimo*
***CE* (dS/m)**	**0,87**	**0,33**	**38**	**2,71**	**0,37**
Desagüe				D-XIX-15	D-XXVIII-5
Fecha				16-11-99	15-6-00
[NO_3^-] (mg/L)	**55**	**35**	**63**	**300**	**1**
Desagüe				D-XVIII-9	D-XIX-11
Fecha				16-11-99	18-5-00

En cuanto a la *CE*, el valor máximo (2,71 dS/m) se presentó en D-XIX-15 el 16-11-99, mientras que el valor mínimo (0,37 dS/m) se midió el 15-6-00 en el desagüe D-XXVIII-5 (desagüe drenante de cuenca de saso).

3.3.1.1 Clasificación de los desagües según su *CE* y [NO_3^-]

Para clasificar los 28 desagües independientes muestreados durante el año hidrológico oct-99/sept-00, se ha utilizado un análisis estadístico multivariante Cluster. Las variables introducidas para clasificar los desagües han sido la *CE* media y la [NO_3^-] media de los catorce muestreos realizados durante el año hidrológico oct-99/sept-00. Los centroides corresponden a los valores medios de los elementos pertenecientes a cada grupo.

Se discriminaron cuatro grupos (Tabla 3.2, Fig. 3.6), de los cuales los grupos 3 y 4 presentan características opuestas: el grupo 3 contiene los desagües con las menores *CE* y [NO_3^-] (CE_3= 0,63 dS/m; $[NO_3^-]_3$= 29 mg/L) mientras que el 4 agrupa a los desagües de mayores *CE* y [NO_3^-] (CE_4= 1,14 dS/m; $[NO_3^-]_4$= 67 mg/L). Los desagües del grupo 1 están caracterizados por presentar *CE* tan bajas como las del grupo 3 (CE_1= 0,67 dS/m) y [NO_3^-] tan altas como las del grupo 4 ($[NO_3^-]_1$= 62 mg/L). El grupo más numeroso es el grupo 2 (39% de los desagües muestreados), cuyos desagües presentan valores de *CE* y [NO_3^-] intermedios entre el resto de los grupos (CE_2= 0,90 dS/m; $[NO_3^-]_2$= 43 mg/L).

Tabla 3.2. Número y porcentaje de desagües muestreados en cada grupo establecido mediante el análisis Cluster, y *CE* y [NO_3^-] de los centroides de los cuatro grupos.

GRUPO	Miembros	%	*CE* (dS/m)$_{centroide}$	[NO_3^-] (mg/L)$_{centroide}$
1	8	29	0,67	62
2	11	39	0,90	43
3	4	14	0,63	29
4	5	18	1,14	67

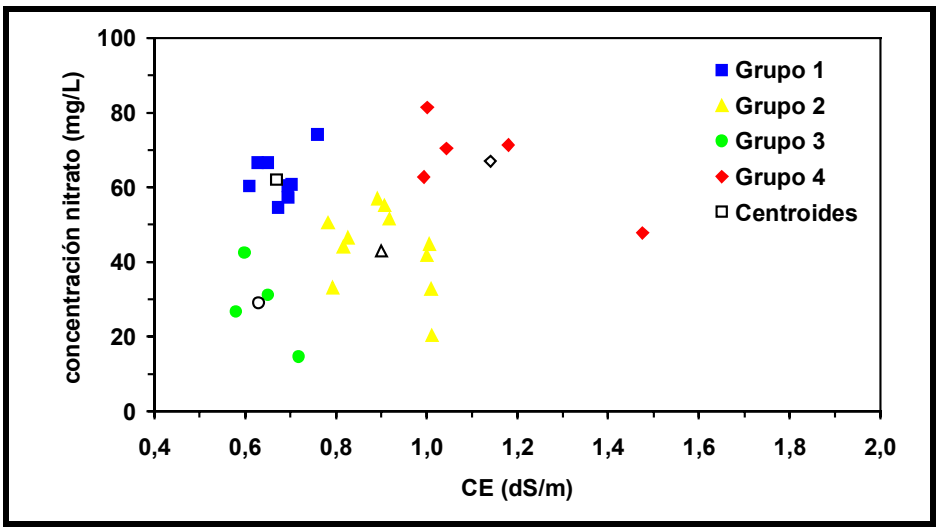


Figura 3.6. Diagrama binario de la *CE* media (dS/m) y [NO_3^-] media (mg/L) de los cuatro grupos y posición de sus centroides.

El dendrograma obtenido en el análisis Cluster (Fig. 3.7) junto con la superposición de los grupos sobre la cartografía de suelos (Fig. 3.8) permite analizar la relación existente entre el factor suelo y la *CE* y [NO_3^-] de los desagües.

El grupo 1 (baja *CE* y alta [NO_3^-]) coincide con aquellos desagües drenantes de cuencas totalmente extendidas sobre el glacis de Miralbueno (sistema glacis-terraza entre los ríos Riguel y Arba de Luesia). Excepcionalmente sorprende la exclusión del desagüe D-XXX-4 (probablemente debido a la dilución de sus aguas por la planta potabilizadora de Ejea de los Caballeros) y la inclusión del C-14 a pesar de que en su tramo final drena suelos desarrollados sobre el sustrato terciario.

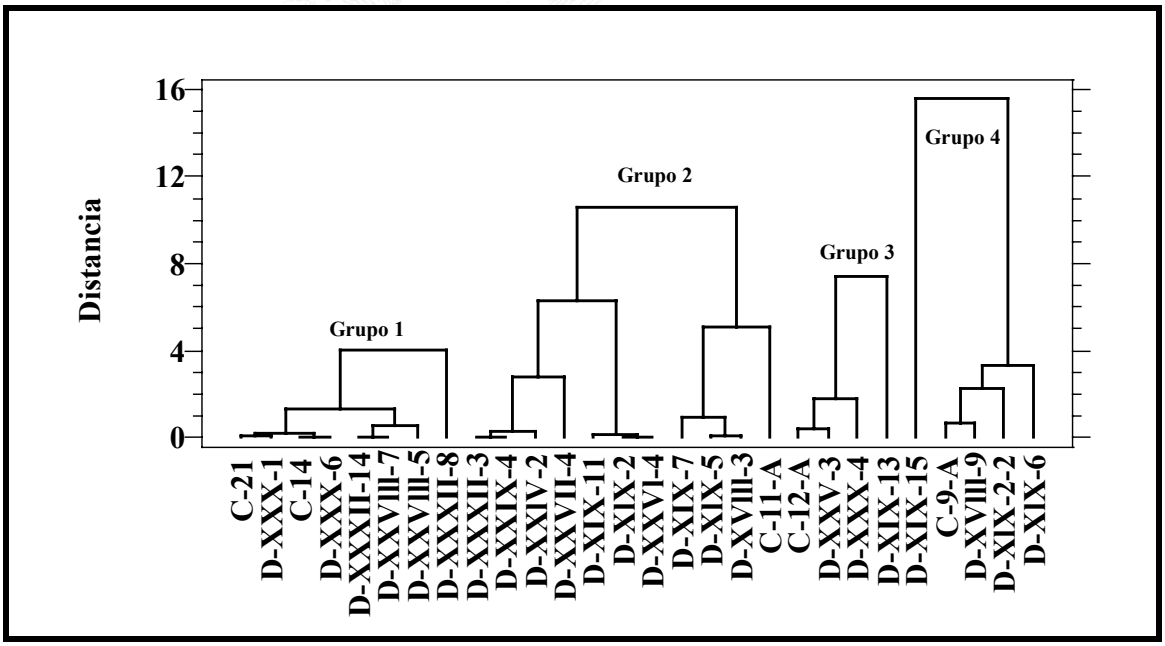


Figura 3.7. Dendrograma del análisis Cluster que agrupa los desagües según las variables *CE* (dS/m) y [NO_3^-] (mg/L).

El grupo 3 (baja *CE* y [NO_3^-]) incluye desagües drenantes de suelos desarrollados sobre valles y laderas. En estos suelos están muy desarrollados los cultivos herbáceos (fertilización nitrogenada baja) y el arroz (mayor escorrentía superficial con bajo contenido en sales) e incluyen la superficie de la CR-V que tiene implantado el sistema de riego por aspersión. La interpretación del dendrograma demuestra la gran similitud entre D-XXV-3 y C-12-A (distancia <1) favorecida por la derivación de agua de un desagüe a otro para su posterior reutilización en el riego.

El grupo 4 (alta *CE* y [NO_3^-]) incluye desagües situados en el glacis de Miraflores (al Oeste del río Riguel). Las filtraciones del Canal de Bardenas son las responsables de que el grupo 1 (desagües drenantes del acuífero de Miralbueno) presente *CE* y [NO_3^-] menores que el grupo 4 (desagües drenantes del acuífero de Miraflores). El dendrograma (Fig. 3.7) detecta la diferencia existente entre D-XIX-15 y el resto de desagües de su grupo (distancia = 15). Ello se debe a que este desagüe drena un área deprimida con problemas de drenaje (Basso, 1994) lo que provoca la acumulación de sales en los suelos de esta zona y la mayor *CE* del desagüe que los drena.

El grupo 2 (*CE* y [NO_3^-] intermedias) incluye desagües que drenan cuencas con características de los otros tres grupos.

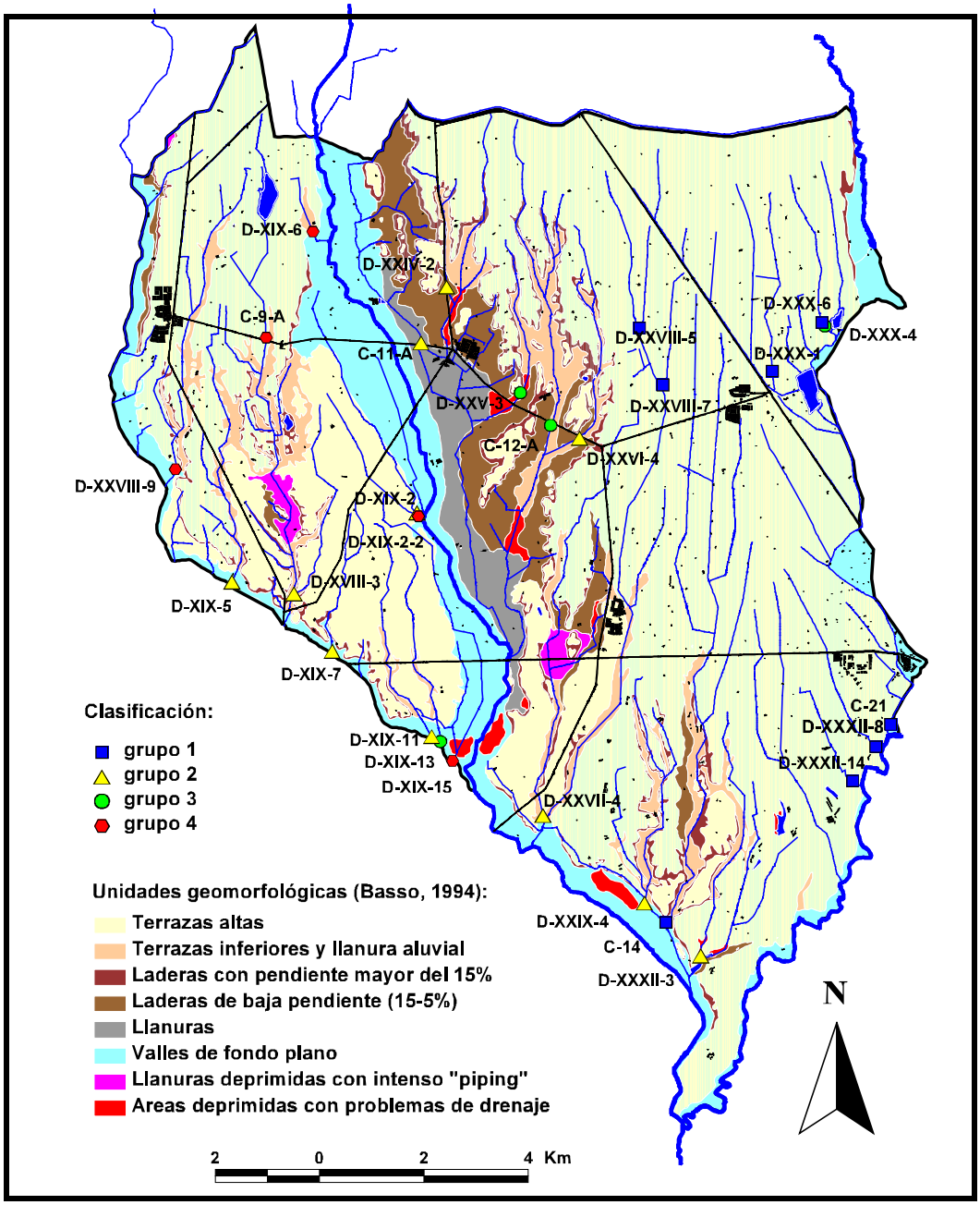


Figura 3.8. Superposición sobre la cartografía de suelos (Basso, 1994) de los puntos de muestreo de los 28 desagües independientes clasificados en grupos mediante análisis Cluster.

Se ha podido comprobar que el factor suelo es determinante en la calidad de las aguas de drenaje, ya que no sólo interviene directamente en la salinidad sino que también incide indirectamente sobre otros factores agronómicos que afectan tanto a la salinidad como a la contaminación por nitratos de las aguas de drenaje (manejo del riego, distribución de cultivos y fertilización nitrogenada de los mismos).

3.3.1.2 Influencia del riego en la calidad de las aguas de drenaje

Para estudiar la influencia del riego en la salinidad y [NO_3^-] se han realizado dos análisis multivariantes Cluster utilizando como variables la *CE* y el volumen de riego en el primer análisis Cluster y la [NO_3^-] y el volumen de riego en el segundo. En el análisis se utilizó el volumen de riego en la CR-V acumulado en los cinco días anteriores a cada muestreo. La unidad temporal elegida en la variable del riego (cinco días anterior al muestreo) es menor que la periodicidad mínima del muestreo (quince días) e incluye el suficiente número de días como para ser representativa de la fecha de muestreo.

Los dos análisis Cluster realizados discriminan 3 grupos que incluyen las mismas fechas de muestreo, presentando un marcado carácter estacional (Fig. 3.9). El primer grupo contiene muestreos realizados durante el verano (30 de mayo, 3 y 14 de julio y el 9 de agosto), el segundo durante el invierno (16 de noviembre, 14 de diciembre, 13 de enero y 17 de febrero) y el tercero el resto de muestreos principalmente concentrados en primavera y otoño (10 de marzo, 25 de abril, 18 de mayo, 15 de junio, 14 de septiembre y 13 de octubre).

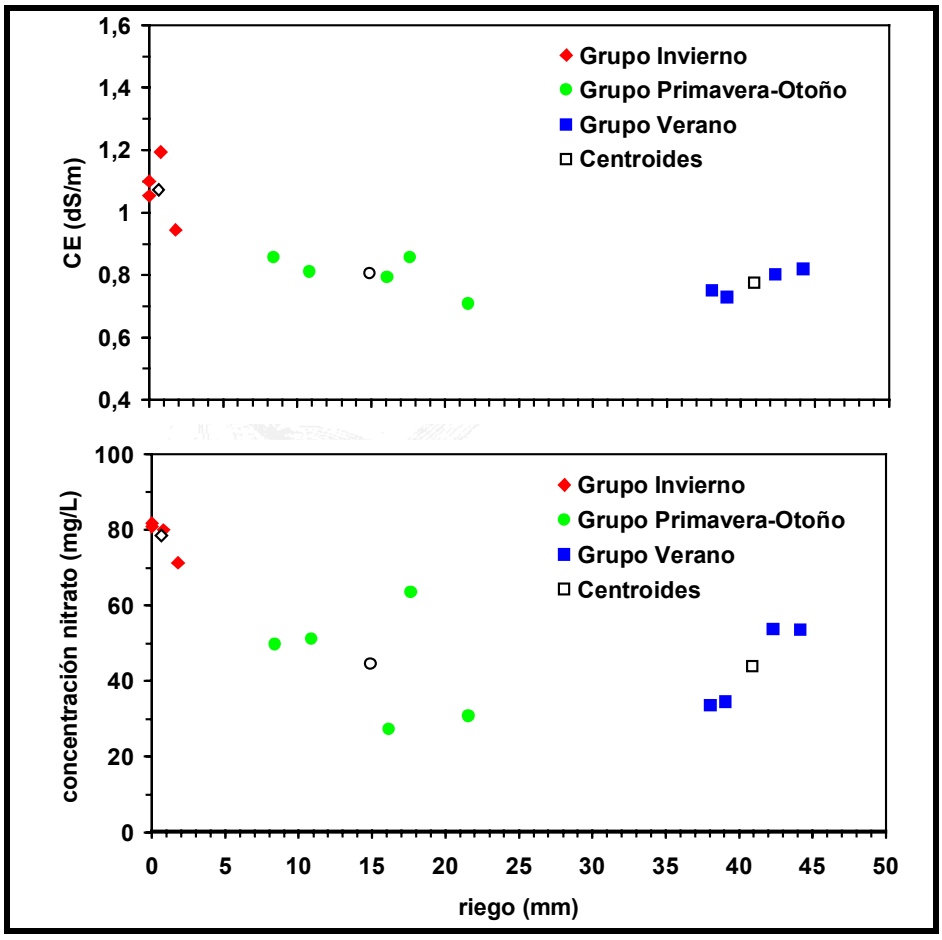


Figura 3.9. Diagramas binarios de *CE* media (dS/m) y [NO_3^-] media (mg/L) de las aguas de drenaje en los 14 muestreos frente a volumen de riego (mm) en la CR-V en los cinco días previos a cada muestreo. Grupos discriminados por el análisis Cluster y posición de sus centroides.

Ha de destacarse que el muestreo del 15 de junio no ha sido incluido en el grupo de verano, donde ya se incluye el muestreo anterior (30 de mayo). Este hecho es atribuible a la disminución del volumen de riego los días anteriores al muestreo debido a las fuertes lluvias acaecidas durante esos días (Capitulo 2).

Las mayores diferencias en los valores de *CE* y [NO_3^-] (Tabla 3.3, Fig. 3.10) se presentan entre el grupo de invierno y los grupos de verano y primavera-otoño. El grupo de invierno, caracterizado por la práctica ausencia de riego (Riego $_{invierno}$= 0,6 mm), presenta los valores más altos de *CE* (*CE* $_{invierno}$= 1,07 dS/m) y [NO_3^-] ([NO_3^-] $_{invierno}$= 79 mg/L).

Tabla 3.3. *CE*, [NO_3^-] y volumen de riego en los cinco días anteriores al muestreo de los centroides en los tres grupos discriminados por los análisis Cluster de las 14 fechas de muestreo.

GRUPO	*CE* (dS/m)	[NO_3^-] (mg/L)	Riego (mm)
Invierno	1,07	79	0,6
Primavera-Otoño	0,80	44	14,3
Verano	0,77	43	40,9

Los grupos de primavera-otoño y de verano presentan valores similares tanto de *CE* (CE_{verano}= 0,77 dS/m , $CE_{\text{primavera-otoño}}$= 0,80 dS/m) como de [$NO_3^-$] ([$NO_3^-$]$_{\text{verano}}$= 43 mg/L, [$NO_3^-$]$_{\text{primavera-otoño}}$= 44 mg/L), a pesar de que los volúmenes de riego en los cinco días anteriores al muestreo en el grupo de verano (Riego= 40,9 mm) son casi tres veces superiores a los del grupo de primavera-otoño (Riego= 14,3 mm).

La dispersión observable en los diagramas binarios (Fig. 3.9) es cuantificable por la medida de similitud (distancia euclidiana al cuadrado) reflejada en los dendrogramas (Fig. 3.10). La menor similitud se presenta en el grupo de primavera-otoño del análisis Cluster efectuado con [NO_3^-]-riego (distancia > 4) debido esencialmente a la variabilidad en la [NO_3^-] impuesta por la fertilización nitrogenada de los cultivos y el régimen de precipitaciones. La mayor similitud (distancia < 0,5) la presenta el grupo de invierno en el análisis Cluster efectuado con [NO_3^-]-riego, debido a que en esta época de muestreo el riego y la fertilización nitrogenada están prácticamente ausentes y la variabilidad climática es baja.

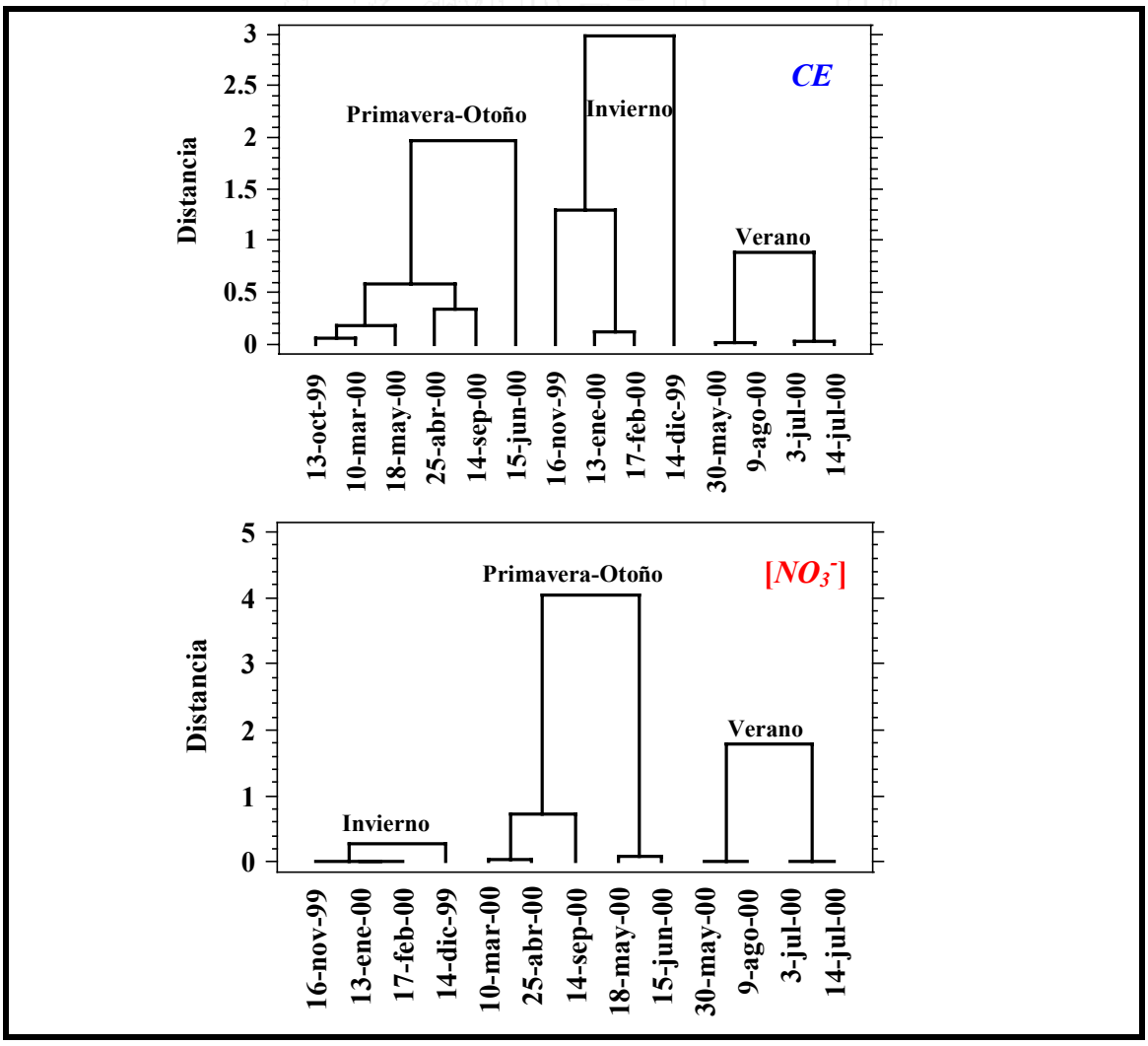


Figura 3.10 Dendrogramas de los análisis Cluster que agrupan las fechas de muestreo según la *CE* (dS/m) media, [NO_3^-] (mg/L) media, y el volumen de riego en los cinco días anteriores al muestreo (mm).

Dado el clima semiárido de la zona de estudio, la distribución del riego puede considerarse como el principal factor condicionante de la variabilidad temporal de la *CE* y [NO_3^-] en las aguas circulantes por los desagües de la CR-V.

La influencia de la distribución de la fertilización nitrogenada de los cultivos sobre la [NO_3^-] de las aguas de drenaje está amortiguada por los elevados flujos de retorno del riego que ejercen un efecto diluente en las aguas circulantes por los desagües.

3.3.2 Calidad del río Riguel a su paso por la Comunidad nº V

Los histogramas de frecuencias para la *CE* y [NO_3^-] de las 112 muestras recogidas a lo largo del río Riguel durante el año hidrológico oct-99/sept-01 (Fig. 3.11) indican que los valores de *CE* se acercan a una distribución normal en la que el 64% de las muestras presentó una *CE* menor de 1 dS/m y con valores máximos condicionados por la *CE* de los desagües que vierten sus aguas al río. Respecto a la distribución de la [NO_3^-], un 92% de las muestras recogidas no superó el límite de 50 mg/L y todas las muestras presentaron [NO_3^-] menores de 80 mg/L.

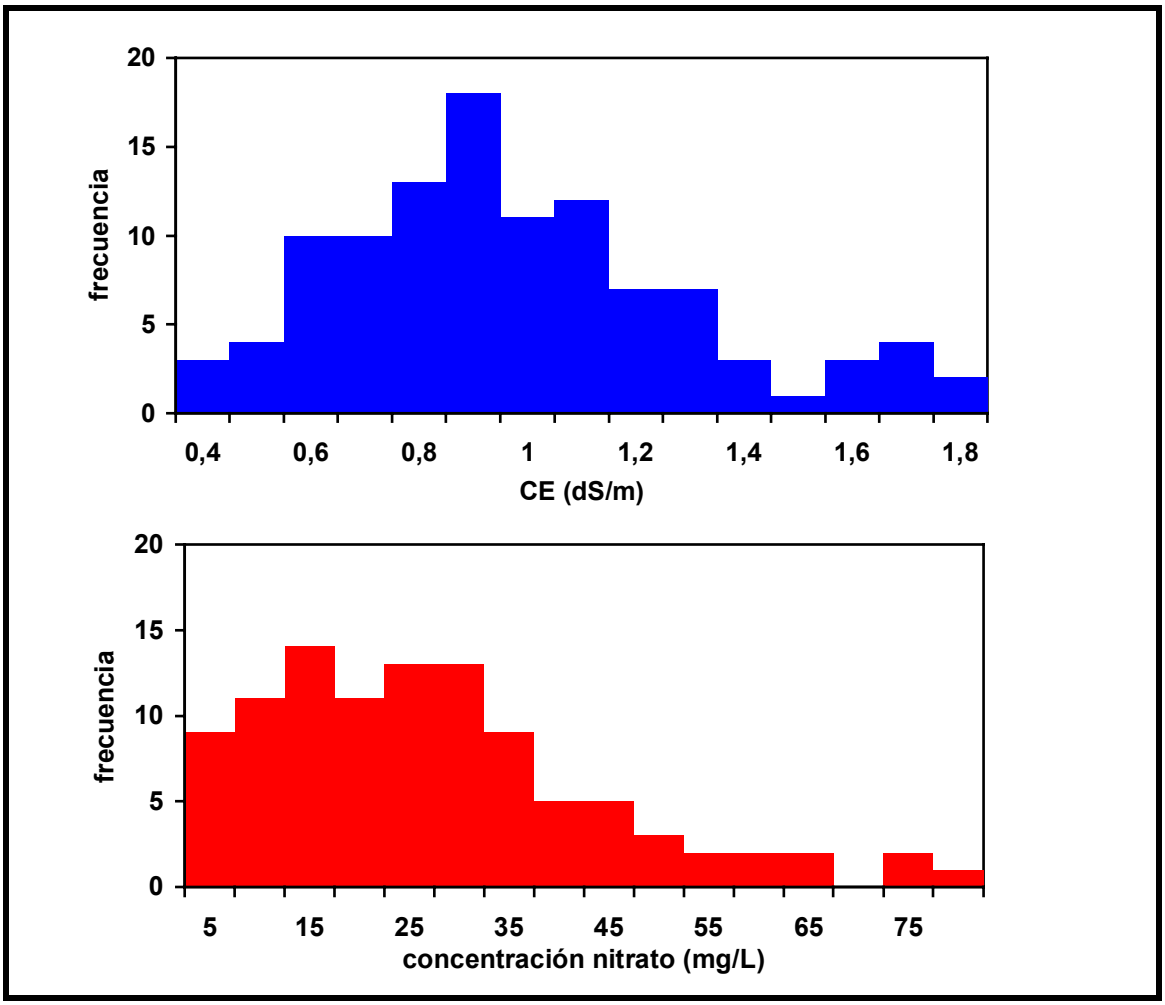


Figura 3.11. Histogramas de frecuencias de la *CE* (dS/m) y [NO_3^-] (mg/L) de las 112 muestras recogidas en el río Riguel durante el año hidrológico oct-99/sept-00.

La Tabla 3.4 presenta la media, desviación típica, coeficiente de variación, máximo y mínimo de la *CE* (dS/m) y [NO_3^-] (mg/L).

La *CE* media fue relativamente baja (0,94 dS/m) y con una variabilidad moderada (*CV*= 35%). El valor máximo (1,75 dS/m) se presentó en el punto R-S-S (primer punto de muestreo tras la desembocadura del barranco de Valareña) el 13-1-00 y el mínimo (0,33 dS/m) en R-SAD (primer punto de muestreo al inicio del regadío) el 9-8-00.

La [NO_3^-] media fue de 25 mg/L, con una variabilidad (*CV*= 69%) que duplicó a la obtenida para la *CE*. La [NO_3^-] máxima (78 mg/L) se presentó en R-XIX (primer punto de muestreo situado tras una presa que en períodos de elevada necesidad de riego corta por completo el flujo del río) el 17-3-00, y la mínima [NO_3^-] (0 mg/L) se presentó en R-SAD el 10-3-00.

Tabla 3.4. Media, desviación típica, coeficiente de variación, máximo y mínimo de la *CE* (dS/m) y [NO_3^-] (mg/L) de 112 muestras de agua recogidas en el río Riguel durante el año hidrológico oct-99/sept-00.

	media	*desv. típica*	*CV (%)*	*máximo*	*mínimo*
***CE* (dS/m)**	**0,94**	**0,32**	**35**	**1,75**	**0,33**
Punto				R-S-S	R-SAD
Fecha				13-1-00	9-8-00
[NO_3^-] (mg/L)	**25**	**17**	**69**	**78**	**0**
Punto				R-XIX	R-SAD
Fecha				17-2-00	10-3-00

En resumen, las aguas del río Riguel presentan valores bajos de *CE* y moderados de [NO_3^-]. Los valores mínimos se presentaron en cabecera del río (inicio del regadío) durante la época de mayor riego y los máximos en muestreos de invierno (caudal base) efectuados en el tramo final del río.

3.3.2.1. Evolución espacial de la *CE* y [NO_3^-]

Los valores medios de *CE* y [NO_3^-] del año hidrológico oct-99/sept-00 aumentaron progresivamente a lo largo del río Riguel desde unos valores mínimos en cabecera (R-SAD: *CE*= 0,55 dS/m; [NO_3^-]= 4 mg/L) hasta unos valores máximos o próximos al máximo en la desembocadura (R-EST: *CE*=1,17 dS/m y [NO_3^-]= 32 mg/L) (Tabla 3.5).

Tabla 3.5. Estadísticos de *CE* (dS/m) y [NO_3^-] (mg/L) en los puntos de muestreo del río Riguel: media, desviación típica (*DT*), coeficiente de variación (*CV*), máximo y mínimo de las catorce fechas de muestreo.

Punto	*CE* (dS/m)					[NO_3^-] (mg/L)				
	media	*DT*	*CV* (%)	máx.	mín.	media	*DT*	*CV* (%)	máx.	mín.
R-SAD	0,55	0,16	29	0,82	0,33	4	3	72	10	0
R-CAL	0,77	0,21	27	1,27	0,54	18	9	48	37	6
R-PRE	0,73	0,19	26	1,24	0,48	19	9	50	35	5
R-D-XIX	0,89	0,22	25	1,29	0,58	37	22	59	78	9
R-AZUD	0,94	0,21	22	1,42	0,67	29	12	41	52	12
R-S-S	1,21	0,32	26	1,75	0,76	26	13	67	72	6
R-SAD	1,21	0,28	23	1,64	0,77	29	17	57	59	9
R-EST	1,17	0,26	22	1,57	0,83	32	15	48	62	11

El mayor incremento relativo de la concentración de nitrato media se produce entre R-SAD ([NO_3^-]= 4 mg/L), al inicio del regadío, y R-CAL ([NO_3^-]= 18 mg/L), primer punto de muestreo dentro del regadío, lo que es atribuible a los retornos de riego más concentrados en nitratos.

En el punto R-D-XIX se obtiene la máxima [NO_3^-] (media de 37 mg/L), debido a que está situado tras un azud que en época de riego llega a derivar todo el caudal del río, provocando que el agua circulante por este punto tenga un origen mayoritariamente subterráneo y por tanto más concentrado en nitrato (Fig. 3.12).

El mayor incremento de la *CE* media se produjo entre R-AZUD y R-S-S (incremento de 0,27 dS/m) debido a que antes de este último punto de muestreo se incorporan las aguas del barranco de Valareña por el que circulan caudales importantes y relativamente salinos, ya que drenan en parte suelos desarrollados sobre materiales del terciario continental con mayor contenido en sales.

La menor fertilidad de los suelos drenados por el barranco de Valareña condiciona la distribución de cultivos y las menores dosis de fertilizantes nitrogenados aplicados (Capítulo 2). Este hecho explica que, aunque la tendencia del río es a aumentar, la [NO_3^-] media sea ligeramente menor en R-S-S (aguas abajo del barranco de Valareña) que en R-AZUD (aguas arriba del barranco).

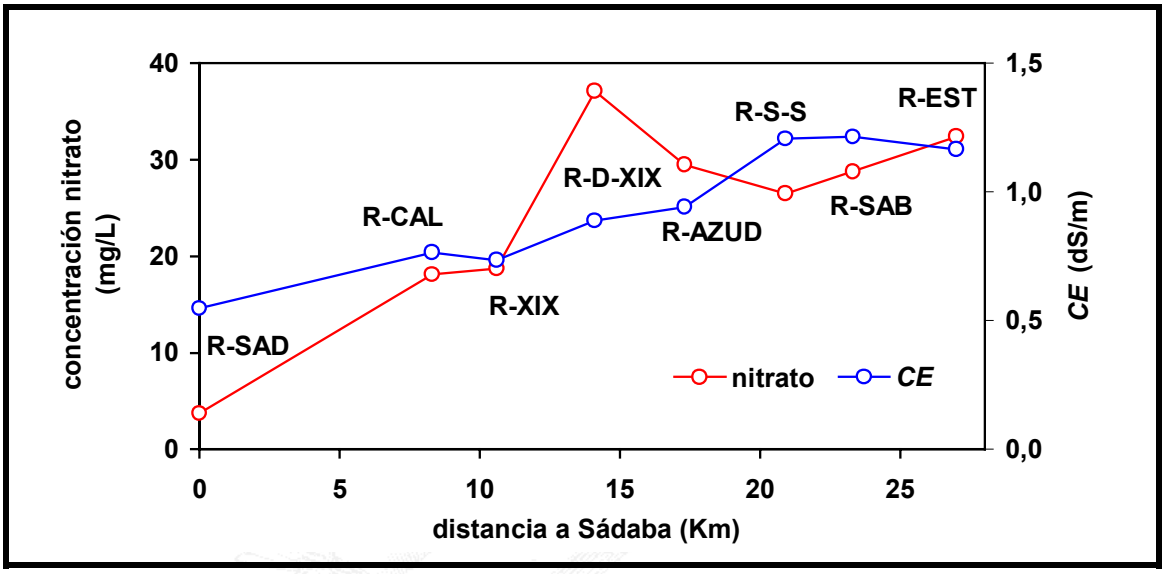


Figura 3.12. Evolución espacial de los valores medios de *CE* (dS/m) y [NO_3^-] (mg/L) del año hidrológico oct-99/sept-00 en los ocho puntos de muestreo sobre el río Riguel.

El progresivo aumento de la *CE* y [NO_3^-] media a lo largo del cauce del río Riguel está favorecido por el incremento a lo largo del río de los flujos de retorno del regadío, la progresiva reutilización del agua del río y de los desagües para el riego y, en el caso particular de la *CE*, por el discurrir del río hacia formaciones geológicas más salinas.

3.3.2.2. Evolución temporal de la *CE* y [NO_3^-]

El análisis de los datos obtenidos para cada una de las 14 fechas de muestreo en los puntos de medida del Riguel (Tabla 3.6), indica que los valores medios más altos de *CE* (1,36 dS/m) y [NO_3^-] (50 mg/L) corresponden al muestreo de 17-3-00, mientras que el valor medio más bajo de *CE* (0,65 dS/m) se presentó el 10-3-00 y el de [NO_3^-] (8 mg/L) el 18-5-00.

La variabilidad de la *CE* en las diferentes fechas de muestreo fue menor que la variabilidad de la [NO_3^-]. Los menores *CV* para la *CE* se presentaron en muestreos realizados poco tiempo después de unas lluvias (*CV*= 15 y 13% en los muestreos del 25-4-00 y 15-6-00) lo que expresa el carácter unificador de las precipitaciones.

En cambio, los mayores coeficientes de variación en la [NO_3^-] se presentaron en los meses de mayor fertilización nitrogenada (*CV*= 77, 64 y 63 para los muestreos del 15-6, 3-7 y 14-7-00) indicando que la fertilización nitrogenada aumentó la variabilidad en [NO_3^-] entre los puntos de muestreo.

El paralelismo en el tiempo de los valores medios de *CE* y [NO_3^-] (Fig. 3.13) demuestra que el principal factor influyente es el comportamiento hidrológico del río condicionado por el riego y las precipitaciones. Únicamente el muestreo del 3-7-00 rompe la pauta. La *CE* del muestreo de este día es menor que la del muestreo anterior (15-6-00) mientras que la [NO_3^-] es similar en ambas fechas. En esta época se aplican los primeros riegos al maíz y hortalizas tras

su fertilización de cobertera. A pesar del efecto diluente de los efluentes de riego, la [NO_3^-] se mantiene o incluso aumenta por el lavado de los fertilizantes nitrogenados aplicados fundamentalmente en el abonado de cobertera del maíz.

Tabla 3.6 Estadísticos de *CE* (dS/m) y [NO_3^-] (mg/L) en las 14 fechas de muestreo del río Riguel: media, desviación típica (*DT*), coeficiente de variación (*CV*), máximo y mínimo de los ocho puntos de muestreo.

Fecha de muestreo	*CE* (dS/m)					[NO_3^-] (mg/L)				
	media	*DT*	*CV (%)*	*máx.*	*mín.*	*media*	*DT*	*CV (%)*	*máx.*	*mín.*
13/10/99	0,84	0,27	32	1,29	0,59					
16/11/99	1,14	0,44	38	1,75	0,62	30	11	38	41	6
14/12/99	1,02	0,24	23	1,35	0,75	27	11	41	41	6
13/01/00	1,22	0,38	31	1,75	0,76	41	17	41	60	10
17/02/00	1,36	0,28	20	1,68	0,82	50	24	49	78	2
10/03/00	0,65	0,17	26	0,92	0,48	11	6	57	18	0
25/04/00	0,77	0,11	15	0,88	0,51	16	7	42	25	4
18/05/00	0,78	0,23	30	1,09	0,48	8	3	41	12	2
30/05/00	0,91	0,26	28	1,29	0,60	16	7	47	29	3
15/06/00	1,07	0,14	13	1,20	0,77	28	21	77	70	12
03/07/00	0,84	0,25	30	1,10	0,39	29	18	64	62	2
14/07/00	0,76	0,24	32	1,04	0,40	22	14	63	42	3
09/08/00	0,73	0,24	33	0,99	0,33	18	8	46	28	2
14/09/00	0,98	0,32	33	1,35	0,43	25	9	37	32	3

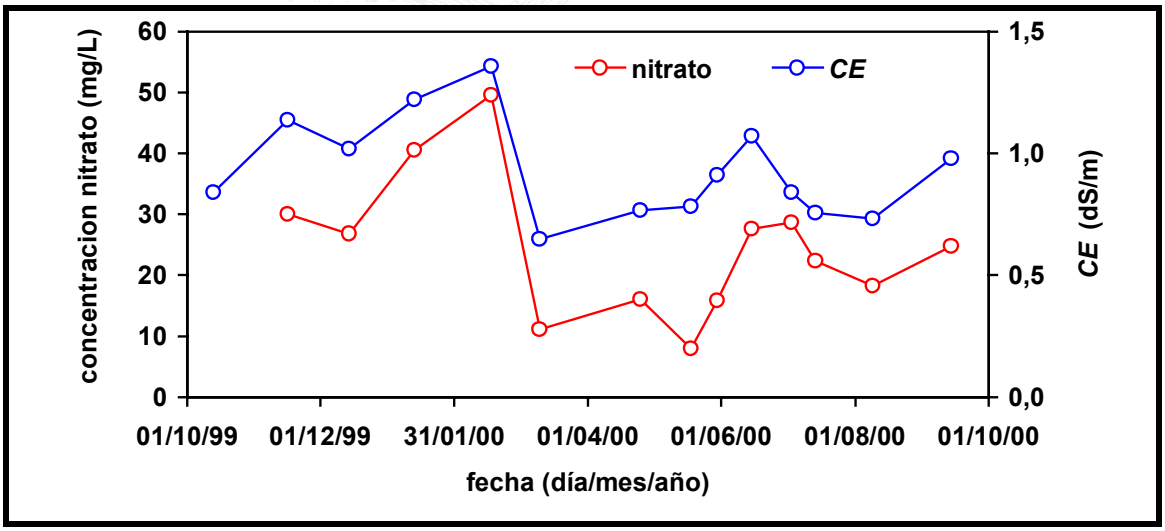


Figura 3.13. Evolución temporal de los valores medios de *CE* (dS/m) y [NO_3^-] (mg/L) medidos en las aguas muestreadas en ocho puntos del río Riguel.

La Figura 3.14 presenta para cada fecha de muestreo las [NO_3^-] medias de los desagües de la CR-V y la [NO_3^-] del Riguel a la salida de esta Comunidad (R-EST). Puede observarse como la evolución de ambas variables en el tiempo es prácticamente idéntica demostrando que el nitrato presente en las aguas del Riguel procede del área agrícola.

En ambos casos (desagües y río) las [NO_3^-] máximas absolutas se presentan en los muestreos de invierno. La llegada de la primavera trae consigo el riego y las precipitaciones que ejercen un efecto diluente hasta que la fertilización nitrogenada de la cobertera del maíz provoca los máximos relativos de los muestreos de julio.

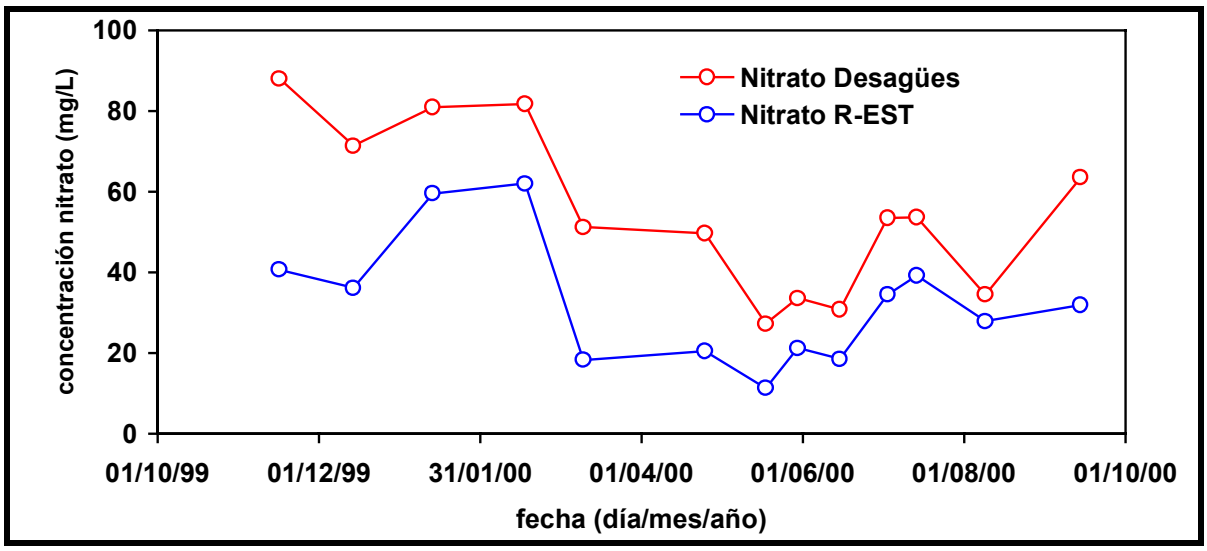


Figura 3.14. Evolución temporal de los valores medios de la [NO_3^-] (mg/L) de los desagües de la CR-V y de la [NO_3^-] (mg/L) en el punto final del río Riguel (R-EST).

En todas las fechas de muestreo la [NO_3^-] media de los desagües es mayor que en el río Riguel debido a la proporción de mezcla de los distintos desagües y a la llegada de flujos bajos en [NO_3^-] del exterior de la CR-V (entre otros el agua circulante por el Riguel en Sádaba: R-SAD= 4 mg/L). Las diferencias en la [NO_3^-] media de los desagües y R-EST disminuyen considerablemente en los meses de mayor riego y ausencia de lluvias (junio, julio y agosto) cuando el caudal circulante por el Riguel procede mayoritariamente de los retornos del riego.

3.3.3 Masa de sales y nitrato exportada a través de la red de drenaje

A pesar de que las mayores concentraciones se presentan en invierno es durante el verano cuando se exportan las mayores masas de sales (450 t/día) y nitrato (18 t/día) (Fig. 3.15). Los elevados flujos de retorno del regadío aumentan el caudal circulante por el río (Figs. 3.15 y 3.16) incrementando las masas de sales y nitratos exportadas.

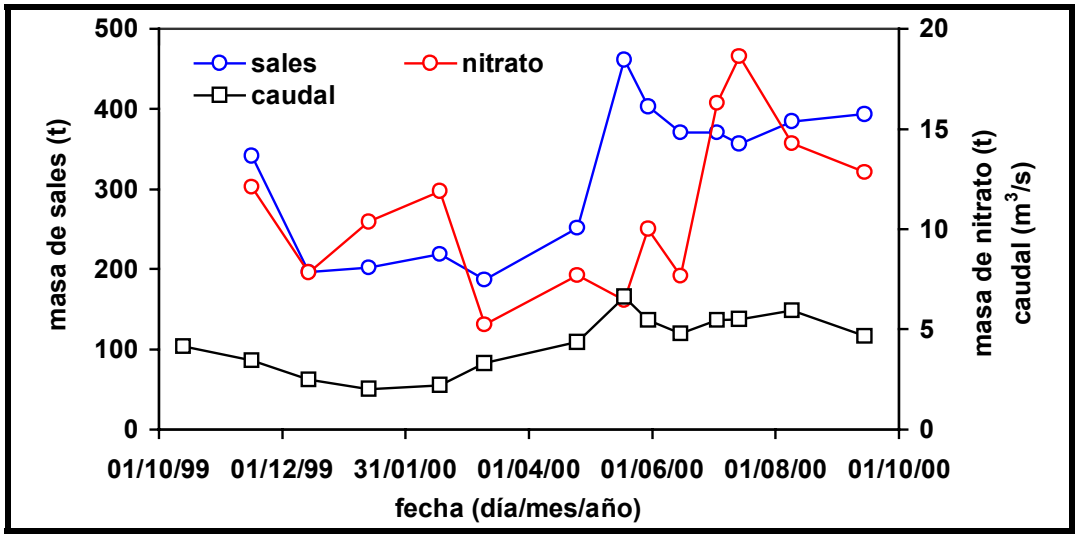


Figura 3.15. Caudal (m^3/s) y masa de sales y nitrato diarias (t/día) en el Riguel (R-EST) tras su paso por la CR-V para las catorce fechas de muestreo.

Mientras la masa de sales responde durante todo el período al caudal del río, la masa de nitrato se ve afectada también por la disponibilidad de nitrato en los suelos. A ello se achaca el ascenso observado durante la fertilización nitrogenada de la cobertera del maíz y el descenso en primavera cuando las lluvias han lavado la mayor parte del nitrato existente en el suelo.

Riguel en Sádaba	Riguel en R-EST (El Sabinar)

Figura 3.16. Río Riguel antes de su entrada en el área regable (Riguel en Sádaba) y a su salida de la CR-V (Riguel en la estación de aforos de El Sabinar).

La regresión entre los caudales diarios que circulan por R-EST y las masas diarias de sales y nitrato en ese mismo punto (Fig. 3.17) nos confirman que la relación existente entre la masa de sales y el caudal (R^2= 0,53) no se mantiene con la masa de nitrato y el caudal (R^2= 0,06) debido a las variaciones del contenido en nitrato en los suelos, que alcanzan unos valores máximos tras la fertilización de los cultivos y unos valores mínimos con el lavado de los suelos por las lluvias del comienzo de la primavera.

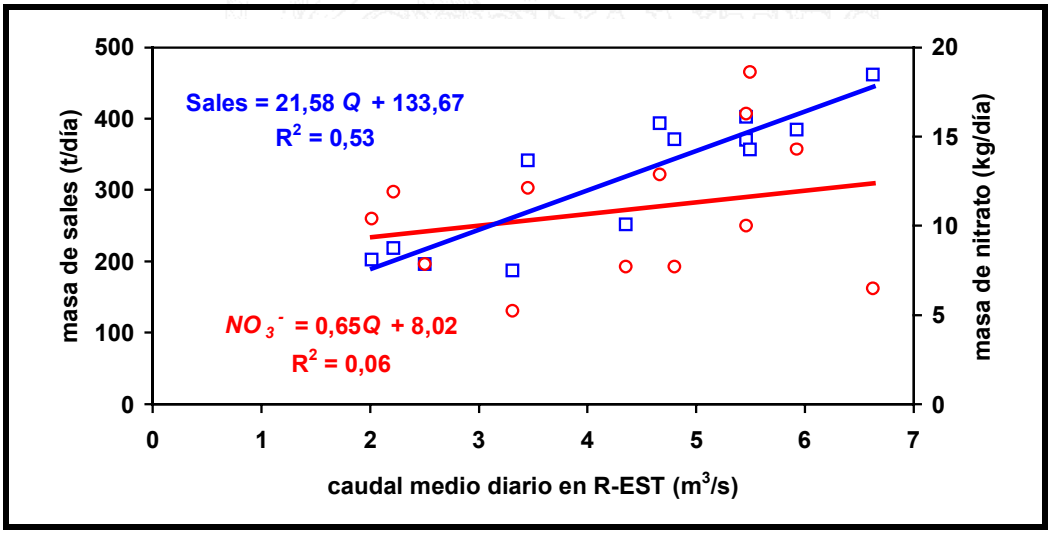


Figura 3.17. Relación entre el caudal (m^3/s) y la masa de sales (t/día) y nitrato (Kg/día) en el río Riguel en la estación de aforos de El Sabinar (R-EST).

3.3.4. Reutilización del agua de drenaje para riego

Las aguas de drenaje de la CR-V presentan en general una salinidad baja, por lo que son aptas para el riego de la mayoría de los cultivos. Resulta difícil realizar una valoración de la cantidad de nitrógeno en la que se podría reducir la emisión de nitrato mediante la reutilización del agua de drenaje para el riego en la CR-V, ya que depende del volumen y número de veces que podamos reutilizar el agua de drenaje y de la eficiencia de riego con que se aplique.

Si asumimos que la eficiencia de riego media en la CR-V a nivel de parcela es del 50% y que el volumen de agua consumido (año 2000) fue de 175 Hm^3, esto implica que podrían reutilizarse como máximo (asumiendo una única reutilización) 87,5 Hm^3 de agua. Dado que el contenido medio de nitrato en las aguas que circulan por los desagües es de 55 mg/L, la cantidad de nitrógeno reutilizada supondría 1.087 t/año o 70 kg N/ha y año, lo que supone aproximadamente la tercera parte del nitrógeno aplicado por fertilización en toda la CR-V durante la campaña del año 2000.

3.4 CONCLUSIONES

- ✓ La excelente calidad del agua del Canal de Bardenas, los rasgos geológicos de los suelos (en su mayor parte sasos de baja salinidad) y las bajas eficiencias de riego en los suelos de saso provocan que por la red de drenaje circulen elevados efluentes de riego de baja salinidad (CE_{media}= 0,87 dS/m).
- ✓ Las características de los suelos y el manejo ineficiente del riego unido a dosis de fertilización nitrogenada superiores a las extracciones de los cultivos, provoca que la concentración de nitrato en la red de desagües sea elevada ($[NO_3^-]_{media}$= 55 mg/L).
- ✓ La clasificación Cluster de los desagües de la CR-V según su *CE* y $[NO_3^-]$ establece cuatro grupos diferenciados asociados a (1) el glacis de Miralbueno (*CE* bajas y $[NO_3^-]$ altas), (2) el glacis de Miraflores (altas *CE* y $[NO_3^-]$), (3) los valles con cultivos herbáceos y arroz (bajas *CE* y $[NO_3^-]$) y (4) un cuarto grupo de características intermedias (*CE* y $[NO_3^-]$ intermedias).
- ✓ El riego, junto a la *CE* y $[NO_3^-]$ de los desagües, dividen el año hidrológico en dos grandes períodos: (1) la estación de no riego, en la que la *CE* y $[NO_3^-]$ son mayores ($CE_{centroide}$= 1,07 dS/m y $[NO_3^-]_{centroide}$= 79 mg/L) y (2) la estación de riego, con valores menores de *CE* y $[NO_3^-]$ ($CE_{centroide}$=0,77 dS/m y $[NO_3^-]_{centroide}$= 43 mg/L).
- ✓ Los efluentes del riego constituyen los principales aportes al río Riguel, cuyas variaciones en la $[NO_3^-]$ responden a las variaciones de la $[NO_3^-]$ en la red de drenaje. Este hecho, junto a la progresiva reutilización de sus aguas para el riego y su discurrir hacia facies con mayor contenido en sales, provocan un aumento lineal de la salinidad y de la $[NO_3^-]$ de las aguas a lo largo de su cauce.
- ✓ Las características geológicas de los suelos desarrollados sobre la CR-V son el principal factor responsable de la evolución espacial de la *CE* y $[NO_3^-]$ de las aguas superficiales. Este factor condiciona a su vez otros factores agronómicos como la distribución de cultivos, el sistema de riego y la fertilización nitrogenada que, a su vez, repercuten en la calidad de las aguas de drenaje.
- ✓ El riego es un condicionante fundamental del régimen hídrico del sistema, provocando que los mayores caudales circulantes se produzcan en los meses estivales a causa de las bajas eficiencias de riego y, consecuentemente, a los elevados flujos de retorno (aguas de percolación y sobrantes de riego).
- ✓ El riego es el principal factor condicionante de la evolución temporal de las aguas superficiales de la CR-V, tanto en la calidad (*CE* y $[NO_3^-]$) como en las masas de sal y nitrato exportadas a través del drenaje. Las mayores masas de sal y nitrato exportadas en el último tramo del río Riguel (R-EST) se producen en el período de riego.
- ✓ La calidad (concentración de sales y nitrato) de las aguas superficiales es menor en la época sin riego y precipitaciones (invierno) y en las zonas con suelo de saso (altas $[NO_3^-]$). El río Riguel, sin alcanzar valores críticos de *CE* y $[NO_3^-]$, presenta un progresivo empeoramiento de la calidad de sus aguas a medida que transcurre por el área agrícola de regadío.
- ✓ Dada la baja salinidad y el contenido moderado de nitrato de las aguas superficiales de la CR-V, se considera recomendable su reutilización para el riego. Dicha reutilización, practicada ya en algunas áreas de la CR-V, favorecería una mayor eficiencia en el uso del agua a nivel de la CR-V, permitiría reducir las dosis de fertilizantes nitrogenados y disminuiría sensiblemente las masas de sal y nitratos exportadas por dicha Comunidad.

4. LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

4.1 INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas siempre se han utilizado como alternativa a las aguas superficiales. Normalmente, el volumen de agua almacenado en los acuíferos es muy grande comparado con el flujo de recarga. Esto implica que el tiempo de residencia de las aguas subterráneas en los acuíferos sea muy superior al de las aguas superficiales en sus reservorios (ríos y lagos).

Los principales problemas de los acuíferos son de contaminación difusa, principalmente por nitratos y por invasión de agua salada. Las contaminaciones puntuales no son un problema grave, exceptuando algunas zonas muy concretas en núcleos industriales o junto a grandes poblaciones.

La contaminación difusa de acuíferos por el nitrato de origen agrario es un problema constatado en muchos países del mundo y especialmente en los países más desarrollados.

Pacheco (1985) evaluó el contenido de nitratos en el agua subterránea de una región rural al Norte de la Península de Yucatán (Méjico). La gran permeabilidad de los suelos de esta zona (calizas) provoca una rápida infiltración de agua hacia el nivel freático sin dar lugar a la existencia de aguas superficiales, razón por la que los acuíferos son necesariamente fuentes de abastecimiento y receptores de aguas de desecho. Los resultados señalaron que el 54% de las muestras tenía una concentración de nitrato mayor de 50 mg/L (límite sanitario) y que existían grandes diferencias en las concentraciones de pozos vecinos, así como un aumento regional progresivo de nitratos en el área estudiada.

Tester y Carey (1985) afirmaron que la extrapolación de datos históricos sobre el contenido de nitrato en el acuífero Great Ouse Chalk (USA) indicaba que de seguir con la tendencia actual, el 37% de los pozos existentes llegaría a valores inaceptables. Sin embargo los pozos que se encuentran ubicados en áreas donde hay poca actividad agrícola o que están bajo espesores considerables de depósitos superficiales, no aumentaban su contenido en nitratos. En este mismo país, se puso en marcha a comienzos de los años 90, un programa (NAWQA) destinado a proporcionar información constante y comparable en los acuíferos más importantes del país (http://water.usgs.gov/nawqa, 2002).

La Unión Europea, considerando que el contenido de nitratos de las aguas de algunas regiones de los Estados miembros estaba aumentando y era elevado en comparación con los niveles establecidos en las Directivas del Consejo relativas a la calidad requerida para las aguas destinadas a la producción de agua potable en los Estados miembros, estableció la Directiva 91/676/CEE del Consejo (de 12 de diciembre de 1991) relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura (DOCE, 1991).

En España, en los abastecimientos de más de un millar de municipios que reúnen a más de dos millones de habitantes (principalmente de la zona mediterránea), se han detectado cantidades superiores al límite sanitario. De los 88 sistemas acuíferos censados en el Atlas Nacional en 1992, la mitad presentan puntos con concentraciones de nitrato superiores a 50 mg/L. De ellos sólo una cuarta parte evolucionan favorablemente en los últimos años. El resto se mantiene estable en sus niveles de contaminación o empeora.

Los altos niveles de concentración de nitrato resultan mucho más problemáticos en algunos depósitos de aguas subterráneas que en los cursos de agua superficiales debido a que los períodos de renovación de sus aguas son muy superiores. De hecho, la contaminación de un acuífero se considera un proceso prácticamente irreversible, razón por la cual es fundamental evitar los procesos que conducen a dicha polución, minimizando la recarga inducida por los sobrantes del riego y controlando el flujo hacia el acuífero de las sales y agroquímicos. En particular, el manejo del nitrógeno (dosis, períodos y formas de aplicación de los fertilizantes nitrogenados) es crítico para reducir la contaminación por nitratos, dado que este anión no

interacciona con la matriz del suelo y, por lo tanto, es muy móvil y fácilmente desplazable con las aguas de percolación profunda que recargan los acuíferos.

En Aragón, la fragilidad de los acuíferos de Gallocanta y Huerva-Jalón ante la posible contaminación de sus aguas por el nitrato de origen agrario ha obligado al Departamento de Agricultura y Medio Ambiente de la Diputación General de Aragón, siguiendo la directiva 676 de la UE, a declarar estas zonas como vulnerables y a establecer un código de buenas prácticas agrarias (BOA del 11 de junio de 1997). Además, en cumplimiento de la normativa de la UE se han establecido programas de actuación específicos de obligado cumplimiento para las dos zonas declaradas vulnerables (BOA del 3 de enero de 2001).

La problemática que conlleva la ejecución de grandes obras hidráulicas constituye a los acuíferos como una alternativa interesante para el almacenamiento de agua, que además puede proporcionar ventajas económicas sustanciales en cuanto a los sistemas de distribución de superficie.

Los acuíferos pueden realizar funciones complementarias a las aguas superficiales, de tal forma que pueden ser utilizados en los períodos más secos y aprovechar los períodos más húmedos para el uso de aguas superficiales. El uso de los recursos hídricos modifica el flujo y la calidad química del agua en los ríos y acuíferos, pudiendo transformar el carácter de los ríos de ganadores a perdedores o viceversa, y ocasionar o aliviar problemas de drenaje o salinidad del agua. El uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas puede ser eficaz para reforzar los efectos positivos o para solucionar o paliar los efectos negativos. Así, en el sistema río Mijares-Plana de Castellón (España) se viene haciendo un uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas consiguiendo una alta regulación de los recursos hídricos, mejora en el balance hídrico de los acuíferos por la disminución de los bombeos en períodos húmedos y freno a la intrusión marina (Sahuquillo, 1993).

Los niveles acuíferos de la CR-V están constituidos por depósitos cuaternarios. Se pueden identificar como principales acuíferos los aluviales de los ríos Riguel y Arba, y los asociados a los glacis de Miraflores (margen derecha del Riguel) y Miralbueno (entre los ríos Riguel y Arba de Luesia) (Fig. 4.1).

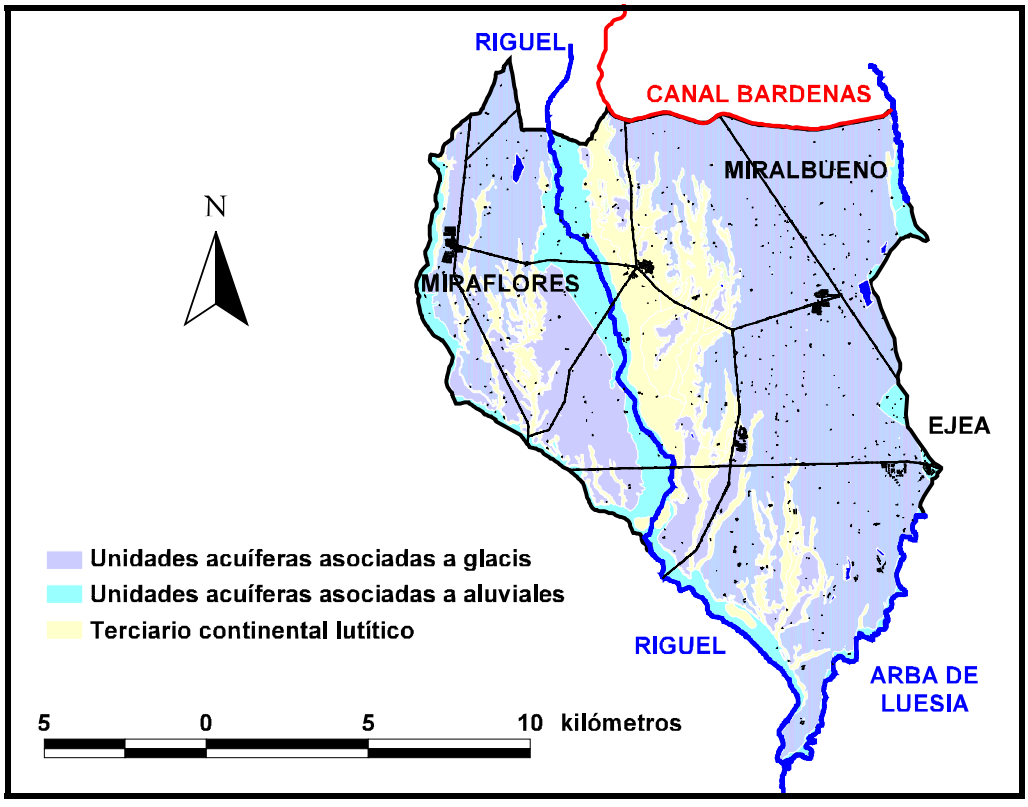


Figura 4.1. Principales unidades acuíferas presentes en la CR-V de Bardenas.

Los glacis y aluviales se asientan sobre las arcillas, limos y areniscas ("buró" en terminología local) de las formaciones terciarias que constituyen el nivel base impermeable en función del cual varía el espesor del acuífero.

Los glacis constituyen acuíferos permeables por porosidad intergranular de una sola capa, de carácter libre y colgado, sin conexión hidráulica con otros acuíferos, salvo el de Miraflores que está conectado con el aluvial del Riguel en su límite oriental. Las formaciones aluviales constituyen acuíferos permeables por porosidad intergranular, de una sola capa y de carácter libre.

La recarga de estos acuíferos proviene del riego y las precipitaciones, mientras que la descarga se produce a través de los ríos (principales ejes de drenaje) hacia los que converge un gran número de zanjas drenantes (desagües).

La explotación de las aguas subterráneas de la CR-V es moderada-baja. La mayoría de las captaciones (pozos) son posteriores a la puesta en riego del polígono de Bardenas (1958) y muchas de ellas se construyeron en la década de los 80 coincidiendo con los primeros años de restricciones de agua para el riego. Actualmente muchos de los pozos construidos en esa época están en desuso.

El aprovechamiento de los recursos subterráneos se concentra mayoritariamente sobre el glacis de Miralbueno debido a su extensión y proximidad a Ejea de los Caballeros. El agua procedente de pozos y manantiales es destinada al uso ganadero y agrícola, y ocasionalmente es utilizada para consumo humano (Fig. 4.2).

Figura 4.2. M-XXVIII-1: Manantial en el contacto entre el glacis de Miralbueno y el sustrato terciario impermeable. P-XXX-3: Pozo con galería utilizado para riego por goteo y aspersión.

Objetivos

- ✓ Analizar el régimen hidrológico de las aguas subterráneas en la CR-V y su evolución espacio-temporal.
- ✓ Modelizar el régimen hidrológico del acuífero de Miralbueno.
- ✓ Cuantificar la concentración de sales y nitrato de las aguas subterráneas en la CR-V y su evolución espacio-temporal.
- ✓ Estudiar el comportamiento de los acuíferos bajo condiciones de riego y agricultura intensiva, y predecir dicho comportamiento frente a cambios en el manejo del riego.
- ✓ Valorar el uso conjunto para el riego de las aguas superficiales y subterráneas.

4.2 MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.1 Seguimiento de las aguas subterráneas de la Comunidad de Regantes nº V

Durante la primavera del año 2000 se realizó un inventario de puntos de agua de interés en el área de estudio. En total se inventariaron 49 puntos (44 pozos y 5 manantiales) distribuidos uniformemente por toda la CR-V. La signatura de cada punto inventariado comienza por las letras M (si corresponde a un manantial) o P (si corresponde a un pozo) seguida por el sector de riego al que pertenece (en números romanos) y por el número de orden dentro del sector.

El inventario que se presenta en el Anejo 2 consta de: datos de registro y situación (hoja topográfica 1:50.000, coordenadas UTM, cota determinada mediante GPS y fotografía), datos técnicos (acuífero al que pertenece, litologías atravesadas, profundidad, diámetro y revestimiento del pozo) y datos sobre el uso del pozo y otras observaciones de interés.

En los 49 puntos de agua inventariados (Fig. 4.3) se realizaron dos muestreos coincidiendo con las épocas de mayor y menor aplicación de riego (julio de 2000 y febrero de 2001). En cuatro pozos del acuífero de Miralbueno (Fig. 4.3) se realizó además un muestreo más intenso durante el año hidrológico oct-00/sept-01 con una frecuencia aproximada de 21 días.

En cada uno de los muestreos realizados se midió el nivel freático y se tomaron muestras de agua en las que se determinó la conductividad eléctrica a 25 ºC (*CE*) con un conductímetro ORION 1.230, y la concentración de nitrato ($[NO_3^-]$) con un cromatógrafo iónico DIONEX 2.000-ISP con supresión química.

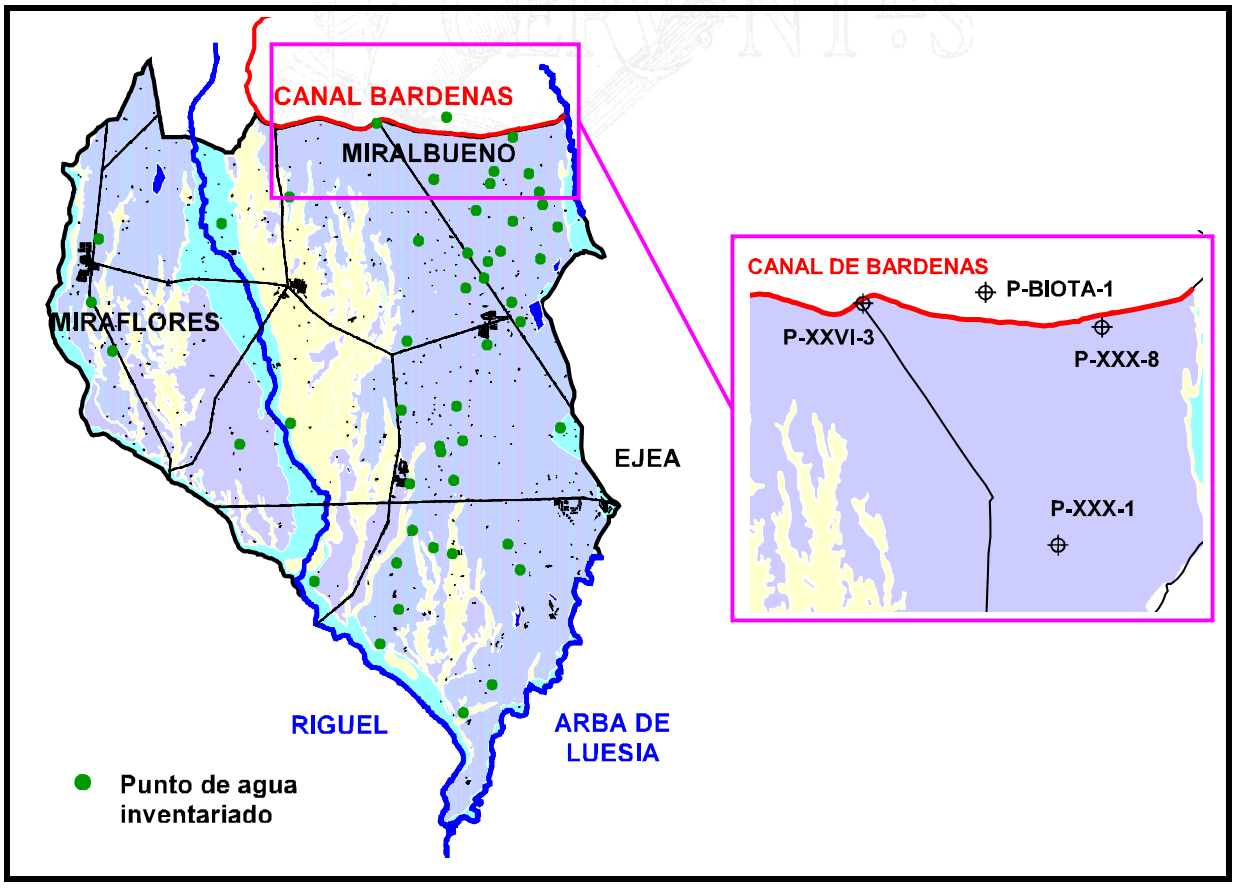


Figura 4.3. Situación de los puntos de agua inventariados en los acuíferos de la CR-V y detalle de los cuatro pozos muestreados cada 21 días en el acuífero de Miralbueno durante el año hidrológico oct-00/sept-01.

4.2.2 Modelización del régimen hidrológico del acuífero de Miralbueno. Programa *BAS-A*

La modelización del comportamiento hidrológico del acuífero de Miralbueno comporta la cuantificación diaria de las entradas (recarga) y salidas (descarga) de agua, que determinan la variación diaria de agua en el acuífero.

La recarga del acuífero está constituida por el volumen de agua que percola por debajo de la zona de raíces de los cultivos o agua de drenaje subsuperficial (*D*). Esta recarga se ha calculado diariamente mediante la realización del balance diario de agua en el suelo que obedece a la ecuación:

$$VS = [R+LL] - [ET_R+D]$$

donde la variación de agua en el suelo (*VS*) es igual a la diferencia entre las entradas (*R*= riego, *LL*= lluvia) y las salidas (ET_R= evapotranspiración real, *D*= drenaje del suelo) de agua en el suelo.

Para estimar diariamente los componentes del balance de agua en el suelo se desarrolló el programa informático *BAS* (Balance Agua Suelo), que modeliza los flujos de agua.

Las variables de entrada a *BAS* son los datos meteorológicos diarios de precipitación, temperatura y evapotranspiración de referencia, los parámetros de los suelos, capacidad de campo, punto de marchitez y humedad inicial del suelo, y los datos agronómicos de dosis de riego diaria, fecha de siembra, temperatura base y grados-día acumulados para alcanzar los distintos estadios fenológicos en cada cultivo.

El programa calcula la evapotranspiración potencial del cultivo (*ETc*) a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_0) y del coeficiente de cultivo (*Kc*):

$$ETc = ET_0 \cdot Kc$$

BAS estima diariamente los coeficientes de cultivo (*Kc*) a partir de la fecha de siembra, de la temperatura base y de los grados-día acumulados para definir las cuatro fases del ciclo de los cultivos herbáceos recomendadas por Allen *et al.* 1998, en función de su estado de desarrollo. El programa calcula los grados-día acumulados a partir del día de siembra sumando la temperatura media diaria cuando ésta supera la temperatura base del cultivo en cuestión. El *Kc* de la Fase I (*Kc* inicial), que se considera constante, depende de la humedad de la superficie del suelo y se calcula en función de la frecuencia de lluvias y riegos y la evapotranspiración de referencia. Durante la fase de desarrollo (Fase II) el *Kc* se incrementa linealmente hasta alcanzar un máximo (*Kc* medio) cuando el cultivo alcanza la cobertura completa del suelo (Fase III). Con la fase de maduración (Fase IV), el *Kc* decrece linealmente hasta el último día del ciclo del cultivo (*Kc* final). Conocidos los grados-día acumulados desde la siembra, que definen cada una de estas fases, *BAS* aplica el *Kc* correspondiente a la fase en que se encuentra el cultivo.

Durante los períodos sin cultivo *BAS* utiliza el coeficiente correspondiente a cada mes para suelo desnudo siguiendo la metodología propuesta por Allen *et al*. 1998, que depende del régimen de precipitaciones y de la evapotranspiración de referencia.

El procedimiento de cálculo se basa en el almacenamiento de las entradas de agua en el suelo (precipitación y riego) provocando un incremento de su humedad. El programa considera que la totalidad de los volúmenes aplicados por el riego y la lluvia se infiltran en el suelo y por lo tanto, la escorrentía y evaporación directa de la lluvia (*LL*) y riego (*R*) no se ha considerado, sabiendo que una pequeña parte de las dosis de riego por inundación puede escurrir superficialmente en los desagües y que la evaporación y arrastre en el caso del riego por aspersión pueden llegar a ser importantes sobre todo si hay presencia de viento (Faci y Bercero, 1991).

El agua útil para las plantas (*AU*) se calcula como la diferencia entre el contenido de agua del suelo y el contenido de agua a punto de marchitez (*PM*). Si la *ETc* es menor o igual

que el agua útil, entonces la evapotranspiración real (ET_R) es igual a la potencial del cultivo (ETc) y el contenido de agua en el suelo disminuye en un valor igual a la ETc.

En el caso de que la ETc sea mayor que AU, entonces la evapotranspiración real (ET_R) es igual al agua útil, quedando en este caso el suelo con un contenido de humedad igual al contenido de agua en el punto de marchitez (PM).

El valor del drenaje (D) depende del contenido de agua del suelo. Si el contenido de agua del suelo es menor que el contenido de agua a capacidad de campo (CC) no se produce drenaje, mientras que en el caso de que sea mayor el drenaje es la diferencia entre el contenido de agua en el suelo y el contenido de agua a capacidad de campo.

Una vez desarrollado el programa *BAS*, se ha desarrollado un módulo referente al acuífero que constituye el programa *BAS-A* (Balance Agua Suelo-Acuífero) y que incorpora la modelización diaria de los flujos de agua en el acuífero (Fig. 4.4).

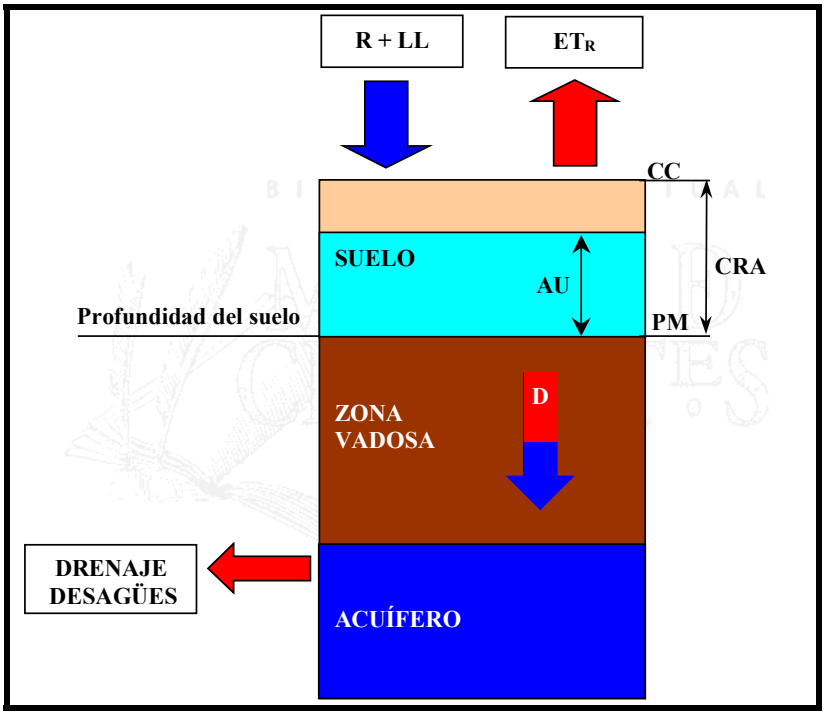


Figura 4.4. Esquema simplificado del modelo conceptual de *BAS-A*. *R*: riego, *LL*: lluvia, *CC*: capacidad de campo, *PM*: punto de marchitez, *CRA:* capacidad de retención de agua, *AU*: agua útil para las plantas, ET_R: evapotranspiración real, *D*: drenaje del suelo.

Las variables adicionales que necesita *BAS-A* son la profundidad inicial del freático, la porosidad eficaz y la relación entre la profundidad del freático y el descenso diario de éste.

Los procedimientos de cálculo del módulo añadido se basan en que dada la elevada permeabilidad del acuífero y sus niveles relativamente superficiales, el agua de drenaje (D) alcanza la zona saturada en un intervalo de tiempo relativamente corto, incrementando el espesor saturado E según la ecuación:

$$\Delta E = D/\Phi e$$

donde el incremento del espesor saturado (ΔE) se obtiene como el volumen de drenaje (D) dividido por la porosidad eficaz del acuífero (Φe). Del mismo modo, el conocimiento de la porosidad eficaz permite convertir el descenso diario del nivel freático en volumen de agua drenado por los desagües.

El descenso diario del nivel freático esta relacionado con la profundidad del freático. Conocida la relación entre estas dos variables, el nivel freático inicial y la recarga diaria, *BAS-A* obtiene la profundidad del freático del día siguiente y cierra el ciclo permitiendo simular diariamente la evolución del nivel freático en el acuífero y estimar la descarga del acuífero.

4.2.3 Validación del modelo *BAS-A* en el pozo P-XXX-1

Para validar el modelo conceptual *BAS-A* se introdujeron datos climáticos y agronómicos del año hidrológico oct-00/sept-01 e información hidrogeológica representativa del glacis de Miralbueno en el pozo P-XXX-1. La simulación de las variaciones diarias del nivel freático durante el año hidrológico oct-00/sept-01 se compararon con las registradas por el limnígrafo instalado en el pozo P-XXX-1 durante ese mismo período (Fig. 4.5).

Figura 4.5. Limnígrafo instalado en el pozo P-XXX-1.

El nivel freático del acuífero en el pozo P-XXX-1 está influenciado por un efecto de recarga general del acuífero y un efecto de recarga local procedente de las parcelas más próximas (Fig. 4.6). Para simular estos dos efectos se ha considerado la recarga del acuífero en el punto de control (P-XXX-1) como la suma de la producida por una parcela ficticia representativa de las 190 ha que constituyen el turno de riego en el que se incluye el pozo P-XXX-1 (efecto general) y de la parcela de 8,25 ha sobre la que se sitúa el pozo P-XXX-1 (efecto local). En ambas parcelas se aplicó el programa *BAS* para estimar la recarga al acuífero.

Los datos introducidos en la parcela representativa del turno de riego corresponden a las medias ponderadas por la superficie de las parcelas que componen el turno. Éste lo forman parcelas con suelos de saso regados por inundación con un 57% de maíz, 24% de alfalfa, 13% de cereal de invierno y un 6% de hortalizas. La parcela donde se incluye el pozo P-XXX-1 fue sembrada de alfalfa el 15 de marzo de 2001 y presenta suelo de saso regado por inundación.

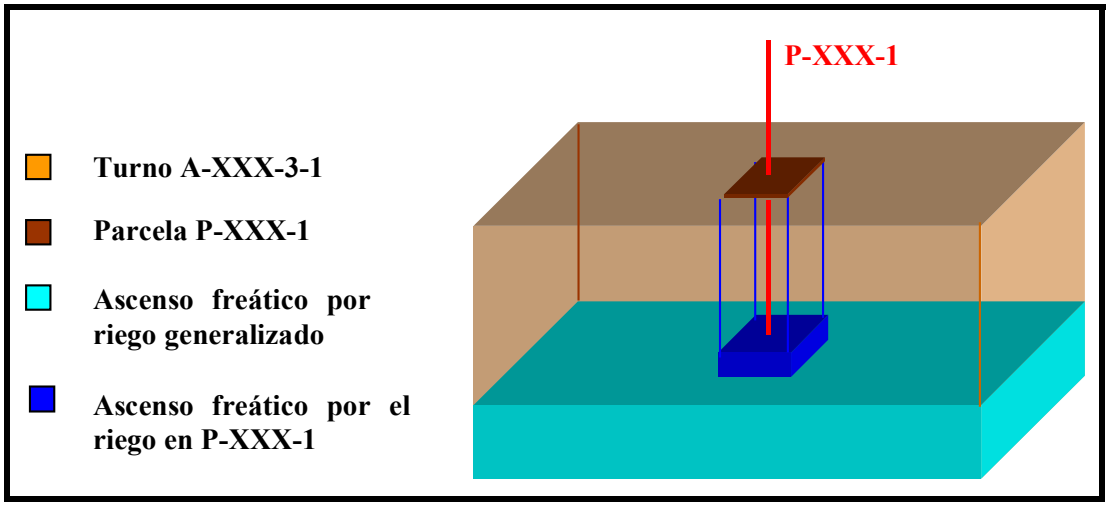


Figura 4.6. Ascenso del nivel freático en el pozo P-XXX-1 producido por el drenaje general de la zona (190 ha) y por el drenaje local de la parcela de 8,25 ha sobre la que se localiza dicho pozo.

Los volúmenes de agua de riego diarios de las parcelas utilizadas en la simulación se tomaron de la base de datos de la CR-V, cuyo personal lo midió a partir de los aforadores construidos en la cabecera de cada acequia.

La precipitación diaria se midió en el pluviómetro de la estación meteorológica automática CR10-Ejea, instalada para este trabajo en el centro geográfico de la CR-V. El programa considera que la totalidad de los volúmenes aplicados por el riego y la lluvia se infiltra en el suelo. Esta aproximación se considera razonable dado que la topografía es prácticamente horizontal, el terreno está abancalado y los suelos son muy permeables por lo que las escorrentías superficiales son mínimas frente al volumen infiltrado.

La evapotranspiración de referencia (ET_0) se calculó mediante el método de Penman-Monteith (Allen *et al*., 1998) a partir de datos climáticos diarios registrados en la estación meteorológica CR10-Ejea. Los valores de *Kc* se obtuvieron de Martínez-Cob *et al*. (1998). En la Tabla 4.1 se presentan los valores de *Kc* junto con la temperatura base y grados-día acumulados para cada cultivo en sus distintos estados de desarrollo (Martínez-Cob, comunicación personal).

Tabla 4.1. Coeficientes de cultivo (*Kc*), temperatura base (*TB*, ºC) e integral térmica (*IT*, ºC) para los principales cultivos desarrollados en la CR-V (Martínez-Cob, comunicación personal).

	CULTIVOS							
	alfalfa	**arroz**	**cebolla**	**girasol**	**maíz**	**pimiento**	**tomate**	**trigo**
				Kc				
Inicial	0,89	1,15	0,25	0,25	0,26	0,24	0,26	0,81
Medio	0,89	1,23	1,08	1,19	1,23	1,07	1,18	1,17
Final	0,89	0,92	0,76	0,36	0,34	0,9	0,9	0,27
				***TB* (ºC)**				
	5	10	4	6	8	10	10	0
				***IT* (ºC)**				
FASE I	-	220	410	320	260	250	190	260
FASE II	-	960	1.270	860	745	730	610	660
FASE III	-	1.330	2.420	1.810	1.755	1.530	1.460	1.690
FASE IV	2.855	1.450	2.950	2.150	1.975	1.650	1.600	2.200

La *CRA* introducida para los suelos fue de 85 mm. Este valor se obtuvo incrementando en un 40% el valor obtenido para los suelos de saso en el estudio edafológico (Capítulo 2). Esta decisión está justificada con los rendimientos productivos del maíz obtenidos en la zona, que no se podrían alcanzar con una *CRA* de 60 mm (11.000 Kg/ha en parcelas regadas por inundación en turnos de 13 días) y porque la metodología utilizada en la determinación de la *CRA* no tuvo en cuenta (a) la capacidad de almacenamiento del agua en la estructura inalterada del suelo (cavidades de origen biológico y huecos formados por los elementos gruesos), (b) la posibilidad de que parte de las raíces atraviesen el petrocálcico, (c) la extracción de agua de las plantas tras los riegos antes de que el suelo alcance *CC* y (d) la posible extracción de agua por debajo de 1,5 Mpa (presión a la cual se ha obtenido el punto de marchitez).

Se ha supuesto que el *PM* no varió para los distintos cultivos ni durante el ciclo vegetativo de estos, considerándose una profundidad de suelo media de 87 cm (Tabla 2.1). Igualmente se ha supuesto que las parcelas están perfectamente cultivadas y los cultivos gozan de un desarrollo óptimo sin estar afectados por anomalías biológicas que pudieran disminuir su evapotranspiración potencial (ET_C).

La ejecución del programa *BAS-A* exige introducir los valores iniciales de humedad del suelo y de profundidad del freático a partir de los cuales se ejecuta el programa. El valor de la humedad inicial del suelo (1 de octubre de 2000) por ser desconocido se introdujo como *PM* + [(*CC*-*PM*)/2] asumiendo un error que es irrelevante frente a la magnitud e incertidumbre de otras variables. El valor de la profundidad inicial del freático introducido fue el registrado por el limnígrafo instalado en P-XXX-1 el 1 de octubre de 2000.

4.2.3.1 Determinación de la relación entre el nivel freático y su descenso diario en P-XXX-1

La relación entre la profundidad del freático y el descenso diario de éste se obtuvo del limnigrama registrado en P-XXX-1 durante el año hidrológico oct-00/sept-01.

Tomando los tramos descendentes entre el nivel máximo alcanzado por las lluvias el 21 de octubre de 2000 (nivel inicial de referencia) y el nivel mínimo de los días anteriores al comienzo generalizado del riego se obtuvo la curva de descarga (Fig. 4.7).

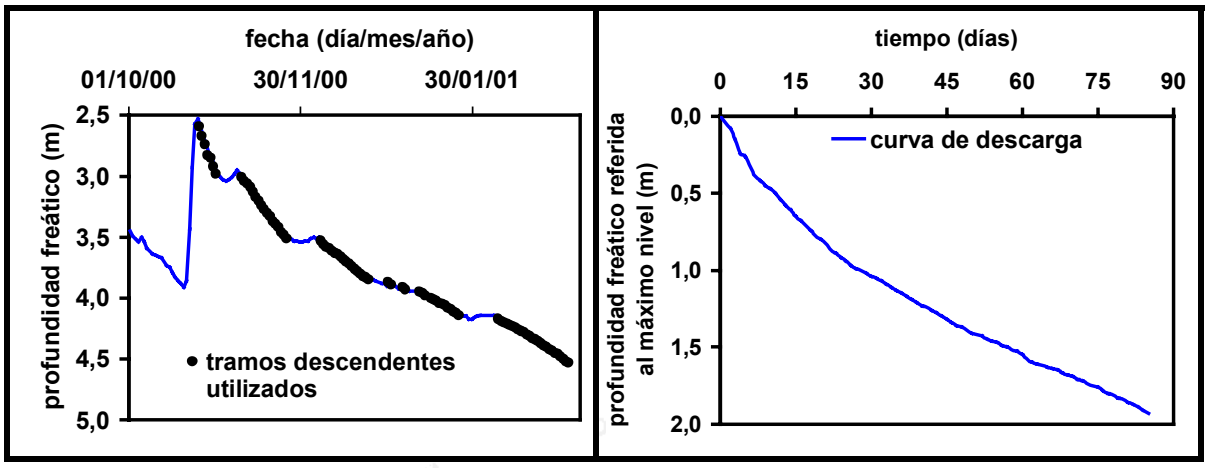


Fig. 4.7. Elaboración de la curva de descarga del acuífero de Miralbueno en P-XXX-1 deducida a partir de los tramos descendentes del limnigrama en estación de no riego.

A partir de ella se determinó el descenso diario que le corresponde a cada profundidad efectuando la diferencia entre la profundidad de un día y la del día anterior. La relación entre el descenso diario (d_p, m/día) y la profundidad del nivel freático p (m) responde a la ecuación:

$$d_p = d_0 \, e^{-\alpha p}$$

donde d_0 (m/día) es el descenso diario para p = 0 (nivel más alto) y α (m^{-1}) es un coeficiente que depende de las características geométricas e hidrológicas del acuífero.

Dadas las características del acuífero en P-XXX-1 se asumió que pueden existir dos tipos de drenaje: uno general del acuífero hacia el Sur y otro local menos regulado, consecuencia de la intersección de los drenes agrícolas. Por ello, la curva de descarga del acuífero se descompuso según un modelo de dos celdas que se diferencian en su grado de regulación.

En los momentos en que el nivel freático se encuentra alto, el descenso del freático es rápido y está condicionado por la celda poco regulada (celda 1). Conforme el nivel freático desciende, la contribución de la celda 2 (celda más regulada) es mayor y el descenso del freático es más lento.

Así, los pares de valores profundidad-descenso diario se han ajustado a una curva de regresión, de forma que el descenso para una profundidad dada es igual al descenso atribuido a la celda 1 más el descenso atribuido a la celda 2. La ecuación obtenida es:

$$d_p = 0{,}070 \, e^{-2{,}940 \, p} + 0{,}023 \, e^{-0{,}286 \, p};\ R^2 = 0{,}85$$

donde a cada profundidad referida al máximo nivel alcanzado (p) le corresponde un descenso (d_p).

La ecuación obtenida muestra que de los 9,3 cm/día (d_0) que descendió el nivel freático para la profundidad de referencia inicial (p= 0, mayor altura del nivel freático) la celda menos regulada produjo un descenso de 7 cm/día, muy superior al descenso de 2,3 cm/día producido por la celda menos regulada.

4.2.3.2 Determinación de la porosidad eficaz del acuífero de Miralbueno en P-XXX-1

La estimación de la porosidad eficaz del acuífero de Miralbueno en P-XXX-1 se realizó mediante geofísica eléctrica. Si en un terreno introducimos una corriente eléctrica, ésta se propaga de tal forma que podemos asignar al terreno una resistencia.

El análisis de los valores de la resistencia eléctrica a distintas profundidades permite identificar las distintas capas del terreno, su profundidad y la resistividad de cada una. La resistividad de cada capa depende de su contenido en agua, de las características de los sólidos, del volumen y distribución de los poros y de la resistividad del líquido que los rellena. Conocido el terreno y su situación respecto al nivel freático podemos deducir su porosidad de forma aproximada utilizando la siguiente ecuación:

$$\rho_t = \frac{\rho_w}{(\Phi S)^2}$$

donde ρ_t es la resistividad del terreno, ρ_w la resistividad del agua, Φ la porosidad y S es la saturación en agua del terreno (Custodio, 1983).

Para determinar el número de capas del perfil, el espesor de éstas, y la resistividad de cada una, el 7 de marzo de 2001 se procedió a realizar junto al pozo P-XXX-1 (acuífero de Miralbueno) un sondeo eléctrico vertical según la configuración de Schlumberger. Esta configuración consiste en cuatro electrodos en línea dispuestos según la Figura 4.8.

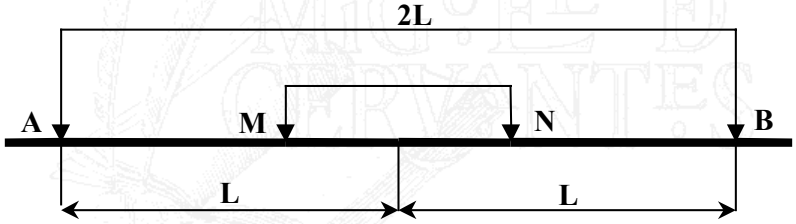


Figura 4.8. Dispositivo Schlumberger (Custodio, 1983).

La corriente eléctrica se establece entre los electrodos exteriores (A y B) clavados verticalmente en el suelo, midiéndose la caída de potencial entre los electrodos interiores (M y N). La profundidad a la que penetra la corriente eléctrica depende de la distancia interelectródica y, en medios estratificados, de las resistividades de las distintas capas.

Mediante este dispositivo rectilíneo y simétrico la resistividad aparente del medio atravesado por la corriente eléctrica se obtiene a partir de la ecuación:

$$\rho = \pi \frac{\Delta V}{I}\left[\left(\frac{L}{MN}\right)^2 - \frac{1}{4}\right]MN$$

donde ρ es la resistividad aparente del terreno, ΔV la diferencia de potencial creada por el circuito entre M y N, I es la intensidad de la corriente y MN es la distancia entre los electrodos internos M y N que debe ser menor de 2L/5 siendo L= AB/2.

Las medidas se efectuaron con un resistímetro MEGGER, modelo 63.220 (Fig. 4.9), que dispone de un generador de corriente manual que proporciona una salida eficaz de 500 V, con una frecuencia de entre 10 y 20 s^{-1}, dependiendo de la velocidad de rotación de la manivela. Los valores de resistencia (ΔV/I) entre los que puede trabajar van desde 0,3 a 20 ohm, con una precisión del ± 1%, y la corriente eléctrica alcanza profundidades de 100 m.

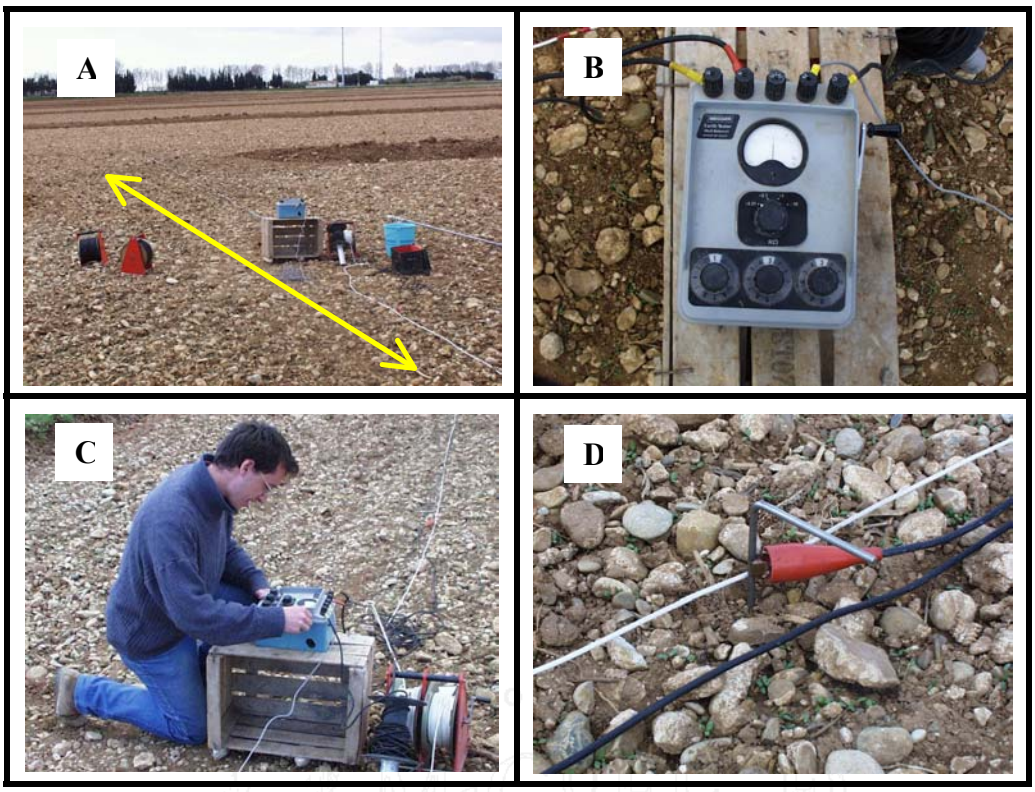


Figura 4.9. (A) Disposición de los electrodos en la configuración Schlumberger (se resalta la alineación de los electrodos); (B) Resistímetro MEGGER 63.220; (C) Procedimiento y lectura de la medida; (D) Detalle de la conexión pinza-gancho y su incrustación vertical en el terreno (15 cm).

El procedimiento de medida consiste en tomar diferentes valores de resistencia del terreno (ΔV/I, lectura del resistímetro) para diferentes distancias entre los electrodos. La Tabla 4.2 muestra las resistividades aparentes obtenidas para las diferentes distancias interelectródicas utilizadas.

Tabla 4.2. Resistencia del terreno (ΔV/I) y resistividades aparentes calculadas (ρ) para las 16 posiciones de los electrodos (MN/2 y AB/2).

Nº de Orden	MN/2 (m)	AB/2 (m)	ΔV/I (ohm)	ρ (ohm·m)
1	0,25	1	22,5	132
2	0,25	1,25	17,6	166
3	0,25	1,6	12,6	198
4	0,25	2	8,6	213
5	0,25	2,5	6,3	244
6	**0,25**	**3**	**4,73**	**266**
7	**0,75**	**3**	**13,3**	**235**
8	0,75	4	7,9	255
9	0,75	5	5,15	263
10	0,75	6,5	2,92	255
11	0,75	8	1,82	242
12	**0,75**	**10**	**1,09**	**227**
13	**2,5**	**10**	**3,85**	**227**
14	2,5	12,5	2,03	191
15	2,5	14,5	1,33	170
16	2,5	20	0,47	116

En el punto siguiente a cada cambio de posición de los electrodos M y N se mantuvieron las distancias A y B presentando resistividades idénticas para los puntos 12 y 13 (Tabla 4.2) y una cierta diferencia entre los puntos 6 y 7, lo que implica un cierto desajuste del sondeo al cambiar la distancia MN de 0,25 a 0,75 m.

Tradicionalmente, la interpretación de los resultados se ha realizado mediante el manejo de ábacos a partir de gráficas logarítmicas entre AB/2 y la resistividad aparente (Custodio, 1983). En el presente estudio la interpretación se realizó mediante el programa informático Winsev 5 (Geosoft, 1999) el cual, a partir de los datos de la posición de los electrodos y resistencia del terreno, calcula la resistividad aparente y construye el gráfico logarítmico entre AB/2 y la resistividad aparente. La curva obtenida se ajusta a un modelo que define el número de capas, y el espesor y resistividad de cada una (Fig. 4.10).

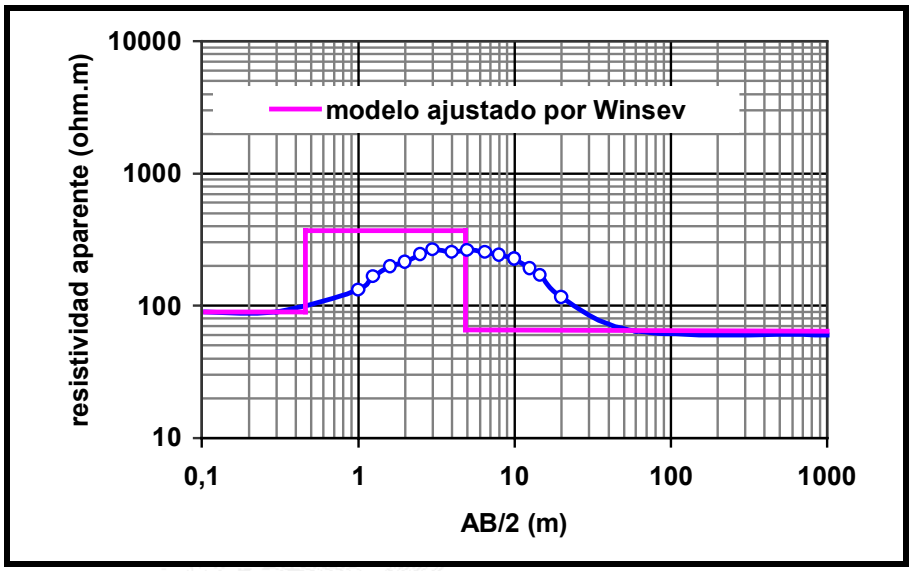


Figura 4.10. Gráfica logarítmica entre AB/2 (m) y resistividad aparente (ohm·m). Modelo ajustado por el programa informático Winsev y parámetros del modelo.

El modelo ajustado por Winsev identifica tres capas (Tabla 4.3). La capa 1 con 46 cm de profundidad corresponde al suelo que presenta una resistividad de 90 ohm·m. Los 4,40 m de la capa 2 de mayor resistividad (371 ohm·m) corresponden a la zona vadosa del perfil que está compuesta por gravas sin saturar en agua. El modelo detecta el nivel freático a los 4,86 m de profundidad. El terreno situado por debajo del nivel freático (gravas saturadas en agua) transmite mucho mejor la electricidad y por tanto presenta resistividades menores (64 ohm·m).

La profundidad del nivel freático en el pozo P-XXX-1 en el momento de realizar el sondeo eléctrico vertical fue de 4,6 m. Teniendo en cuenta que la posición exacta del sondeo estaba situada ligeramente por encima de la base del pozo P-XXX-1, se puede concluir que la geofísica eléctrica produjo unos resultados aceptables para estimar la profundidad del nivel freático en el acuífero de Miralbueno.

Tabla 4.3. Capas discriminadas por el modelo y sus respectivas resistividades, espesores y profundidad a la que se encuentran.

Nº de capa	Resistividad (ohm·m)	Espesor (m)	Profundidad (m)
1	90	0,46	0,00
2	371	4,40	0,46
3	64	-	4,86

La sensibilidad del resistímetro utilizado (entre 0,3 y 20 ohm) impidió profundizar más el sondeo mediante mediciones con mayores aperturas de alas (AB). Por ello, no se pudo determinar la profundidad a la que se encuentra el sustrato impermeable y, por lo tanto, el espesor de gravas saturadas en agua. La potencia del glacis de Miralbueno en el punto del

sondeo según el propietario del pozo P-XXX-1 coincide con la profundidad del propio pozo (6 m).

La resistividad del agua del acuífero en el lugar del sondeo se calculó a partir de una muestra de agua del pozo P-XXX-1 determinando su *CE* a la temperatura ambiente (0,81 dS/m) y utilizando la ecuación $\rho_w\,(ohm\cdot m) = 10 / CE\,(dS/m)$.

La porosidad total se obtuvo a partir de la ecuación:

$$\rho_t = \frac{\rho_w}{(\Phi S)^2}$$

utilizando la resistividad del agua, ρ_w= 12,2 ohm·m, la resistividad del terreno saturado en agua, ρ_t= 64 ohm·m y un valor de saturación, S= 1. La porosidad total calculada fue del 43%.

Conocida la porosidad total de las gravas (43%) y la resistividad del terreno en la zona vadosa (ρ_t = 371 ohm·m) se obtuvo a partir de la ecuación anterior un valor de saturación para la zona vadosa de 0,41.

Durante los días anteriores al sondeo eléctrico vertical no se registraron precipitaciones ni riegos con lo cual el agua retenida en la zona vadosa corresponde a agua no gravífica. Los poros no ocupados por agua constituyen la porosidad eficaz (volumen de poros susceptibles de ser ocupados por agua gravífica) obteniéndose un valor del 25% que coincide con el valor propuesto por Custodio (1983) como valor medio de porosidad eficaz en gravas sueltas.

4.2.4 Simulación de hipotéticos escenarios con *BAS-A*

Para estudiar la respuesta del sistema agrario ante hipotéticos escenarios que contemplen cambios en el manejo del agua se han simulado con el programa *BAS-A* una serie de condiciones de riego y captación de agua subterránea manteniendo las condiciones climáticas, agronómicas e hidrogeológicas introducidas para la validación de *BAS-A*. Los escenarios y condiciones impuestas son las siguientes:

- ✓ *Escenario I*: Simula el cambio a sistemas de riego de alta eficiencia ($ET_R / R+LL$ >90%) en la parcela de 8,25 ha en la que se ubica el pozo P-XXX-1, imponiendo que a partir del día de siembra (15 de marzo de 2001) cuando el agua útil en el suelo es inferior al 75% de la *CRA* se aplica un riego cuya dosis coincide con la *ETc* del día anterior.

- ✓ *Escenario II*: Simula el cambio a sistemas de riego de alta eficiencia en todo el sistema agrario imponiendo la condición de riego del escenario I tanto en la parcela del pozo P-XXX-1 como en la parcela de 190 ha representativa del turno de riego.

- ✓ *Escenario III*: Simula el bombeo de agua del acuífero para el riego de la parcela de 8,25 ha del pozo P-XXX-1, según la condición impuesta en el escenario I. Este escenario asume que el tipo de captación no actúa como factor limitante de la extracción de agua del acuífero.

No ha sido contemplado un escenario que simule el uso de agua subterránea para el riego de la parcela representativa de todo el turno de riego ya que, como se verá posteriormente, la capacidad del acuífero es insuficiente para abastecer del agua necesaria a las 190 ha del turno de riego.

4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3.1 Inventario de puntos de agua de interés en la Comunidad nº V

De los 49 puntos inventariados sólo cinco corresponden a manantiales, aunque cabe destacar que son numerosos los que surgen del contacto entre el terciario impermeable y los glacis, siendo más caudalosos en época de riego (Tabla 4.4).

Tabla 4.4. Inventario de puntos de agua y sus características principales.

Punto	X (UTM)	Y (UTM)	Cota	Acuífero	Litología	Prof. (m)	Diám. (m)	Uso
M-XXVIII-1	646607	4666746	340	Miralbueno	Gravas			Sin uso
M-XXIX-1	647277	4664946	330	Miralbueno	Gravas			Ganadero
M-XXX-1	650799	4674021	405	Miralbueno	Gravas			Sin uso
M-XXX-2	648025	4670689	378	Miralbueno	Gravas			Riego huerto
M-XXXII-1	648123	4660266	293	Miralbueno	Gravas			Boca
P-XVIII-1	638168	4670505	353	Miraflores	Gravas	6,85	1,10	Invernadero
P-XVIII-2	637570	4671893	360	Miraflores	Gravas	4,30	1,00	*Ce*menterio
P-XVIII-3	637769	4673687	371	Miraflores	Gravas	3,50	1,20	Invernadero
P-XIX-1	641772	4667872	337	Miraflores	Gravas			Invernadero
P-XXIV-1	643185	4674871	417	Miraflores	Gravas	4,50	1,00	Sin uso
P-XXIV-2	641263	4674124	373	Aluvial Riguel	Arenas	3,10	0,80	Sin uso
P-XXV-1	643225	4668461	336	Aluvial Riguel	Arenas	5,00	1,70	Otros
P-XXVI-1	646526	4670797	384	Miralbueno	Gravas	5,00	1,00	R. Aspersión
P-XXVI-2	646360	4668839	362	Miralbueno	Gravas	3,00	1,00	Ganadero
P-XXVI-3	645731	4676937	443	Miralbueno	Gravas	15,00	1,30	Sin uso
P-XXVII-1	643893	4663987	312	Miralbueno	Gravas	2,90	1,00	Otros
P-XXVIII-1	647452	4667809	354	Miralbueno	Gravas	7,00		Ganadero
P-XXVIII-2	647483	4667653	353	Miralbueno	Gravas	4,00	1,10	Otros
P-XXVIII-3	647852	4666850	345	Miralbueno	Gravas	5,00	1,20	Ganadero
P-XXVIII-4	648108	4667961	353	Miralbueno	Gravas	4,00	1,50	Otros
P-XXVIII-5	647928	4668949	361	Miralbueno	Gravas	5,00	1,20	Sin uso
P-XXVIII-6	648185	4672296	392	Miralbueno	Gravas	7,00	1,20	R. Aspersión
P-XXVIII-7	646848	4673631	405	Miralbueno	Gravas	4,00	1,00	Otros
P-XXIX-1	646676	4665428	335	Miralbueno	Gravas	5,00	1,00	Otros
P-XXIX-2	646237	4664510	327	Miralbueno	Gravas	5,00	1,00	Otros
P-XXIX-3	646285	4663193	316	Miralbueno	Gravas	3,00	1,00	Otros
P-XXIX-4	645766	4662213	302	Miralbueno	Gravas	3,50	1,30	Otros
P-XXIX-5	647811	4664767	331	Miralbueno	Gravas	3,50	1,00	Ganadería
P-XXX-1	648910	4673047	398	Miralbueno	Gravas	6,00	1,00	Otros
P-XXX-2	649136	4673323	401	Miralbueno	Gravas	7,00	1,00	Ganadería
P-XXX-3	648880	4675249	423	Miralbueno	Gravas	7,00	1,00	R. Aspersión
P-XXX-4	648978	4675619	428	Miralbueno	Gravas	6,10	1,00	Ganadería
P-XXX-5	648247	4673290	404	Miralbueno	Gravas	4,50	1,00	Sin uso
P-XXX-6	649493	4671887	385	Miralbueno	Gravas		1,20	Ganadería
P-XXX-7	647272	4675368	425	Miralbueno	Gravas		1,50	Sin uso
P-XXX-8	649528	4676572	439	Miralbueno	Gravas		2,00	Sin uso
P-XXX-9	649981	4675535	426	Miralbueno	Gravas	3,30	1,00	Otros
P-XXX-10	650277	4675013	421	Miralbueno	Gravas	7,00	1,00	Ganadería
P-XXX-11	650375	4674649	415	Miralbueno	Gravas	3,75	1,00	Otros
P-XXX-12	648488	4674502	417	Miralbueno	Gravas			Otros
P-XXX-13	648715	4672579	393	Miralbueno	Gravas	5,50		Ganadería
P-XXX-14	649505	4674193	410	Miralbueno	Gravas			R.Goteo
P-XXX-15	650310	4673123	396	Miralbueno	Gravas	3,00	1,00	Riego
P-XXXI-1	648802	4670688	375	Miralbueno	Gravas	3,50	0,90	Otros
P-XXXI-2	650875	4668335	348	Miralbueno	Gravas	3,90	1,00	Boca
P-XXXII-1	648945	4661064	301	Miralbueno	Gravas	3,25	1,00	Ganadería
P-XXXII-2	649738	4664321	324	Miralbueno	Gravas	3,00	1,20	Sin uso
P-XXXII-3	649387	4665036	331	Miralbueno	Gravas	3,50	1,00	Sin uso
P-BIOTA-1	647619	4677136	448	Miralbueno	Gravas	>16	2,00	Sin uso

La mayoría de los puntos se inventariaron en el acuífero de Miralbueno ya que es el de mayor extensión y densidad de pozos. La profundidad de los pozos está condicionada por las características geológicas de la zona.

Los pozos más profundos son los situados en el área más septentrional del glacis de Miralbueno donde pueden llegar a alcanzar más de 16 m de profundidad (P-Biota-1). A medida que se sitúan más hacia el Sur, la potencia del glacis disminuye (ITGE, 1985) y tanto el nivel freático como el sustrato terciario impermeable se encuentran más cercanos a la superficie, lo que condiciona que la profundidad de los pozos disminuya llegando hasta profundidades mínimas de los pozos inventariados en torno a los 3 m.

La mayor parte de los pozos se encuentran revestidos. Los más antiguos presentan un revestimiento de piedra mientras que los más modernos son de tubería perforada de 1,2 m de diámetro.

Algunos de los pozos se construyen con una galería de orientación Este-Oeste (perpendicular al flujo regional) situada a unos 5 metros de profundidad (profundidad máxima accesible a las máquinas retroexcavadoras). Esta galería mejora la captación de agua del acuífero a la vez que actúa como depósito subterráneo.

Muchos de los pozos están actualmente sin uso o simplemente se utilizan para el abastecimiento de pequeñas casetas de campo. Las explotaciones ganaderas, especialmente las porcinas, dependen en gran medida de ellos ya que les proporcionan los volúmenes de agua necesarios de forma continuada durante todo el año.

Para determinados cultivos los turnos de riego cada trece días resultan demasiado largos. Existen pozos que abastecen de agua a sistemas de riego por aspersión y goteo e incluso se llegan a emplear en algún riego por inundación. La utilización del agua subterránea para el riego permite un riego a la demanda, pudiendo satisfacer en cada momento las necesidades hídricas de los cultivos.

4.3.2 Piezometría y calidad de las aguas subterráneas de la Comunidad nº V

Los valores de *CE* y [NO_3^-] de los muestreos de julio de 2000 y febrero de 2001 en los puntos inventariados han sido clasificados en 6 grupos y cartografiados sobre las unidades acuíferas de la CR-V (Fig. 4.11).

La *CE* de los puntos muestreados osciló entre los 2,5 dS/m (P-XVIII-2 en julio de 2000) y los 0,38 dS/m del pozo más cercano al Canal de Bardenas (P-XXVI-3 en febrero de 2001). El grupo más representado es el que presenta valores de *CE* entre 0,75 y 1 dS/m.

La mayor [NO_3^-] registrada fue de 285 mg/L (P-XXIX-1 en febrero de 2001) y la menor de 8 mg/L (P-XXVI-3 en febrero de 2001). En verano el grupo más numeroso es el que abarca el rango entre 50 y 100 mg/L mientras que en invierno pasa a serlo el grupo entre 100 y 150 mg/L.

Los pozos y manantiales muestran una tendencia generalizada hacia la disminución de la *CE* y [NO_3^-] en época de riego.

La baja pluviometría provocó que en ausencia de riego el volumen de agua que percola desde el suelo hacia el acuífero sea bajo y relativamente concentrado en sales y nitrato. La aplicación de riegos de baja eficiencia aporta grandes filtraciones de flujos de baja *CE* y [NO_3^-] que diluyen las aguas subterráneas.

Durante la época de riego, algunos pozos aislados presentaron valores de *CE* y [NO_3^-] menores que los de los pozos situados a su alrededor. Este hecho es consecuencia del carácter difuso de la aplicación del riego que puede diluir las aguas de un pozo sin afectar a otros pozos cercanos.

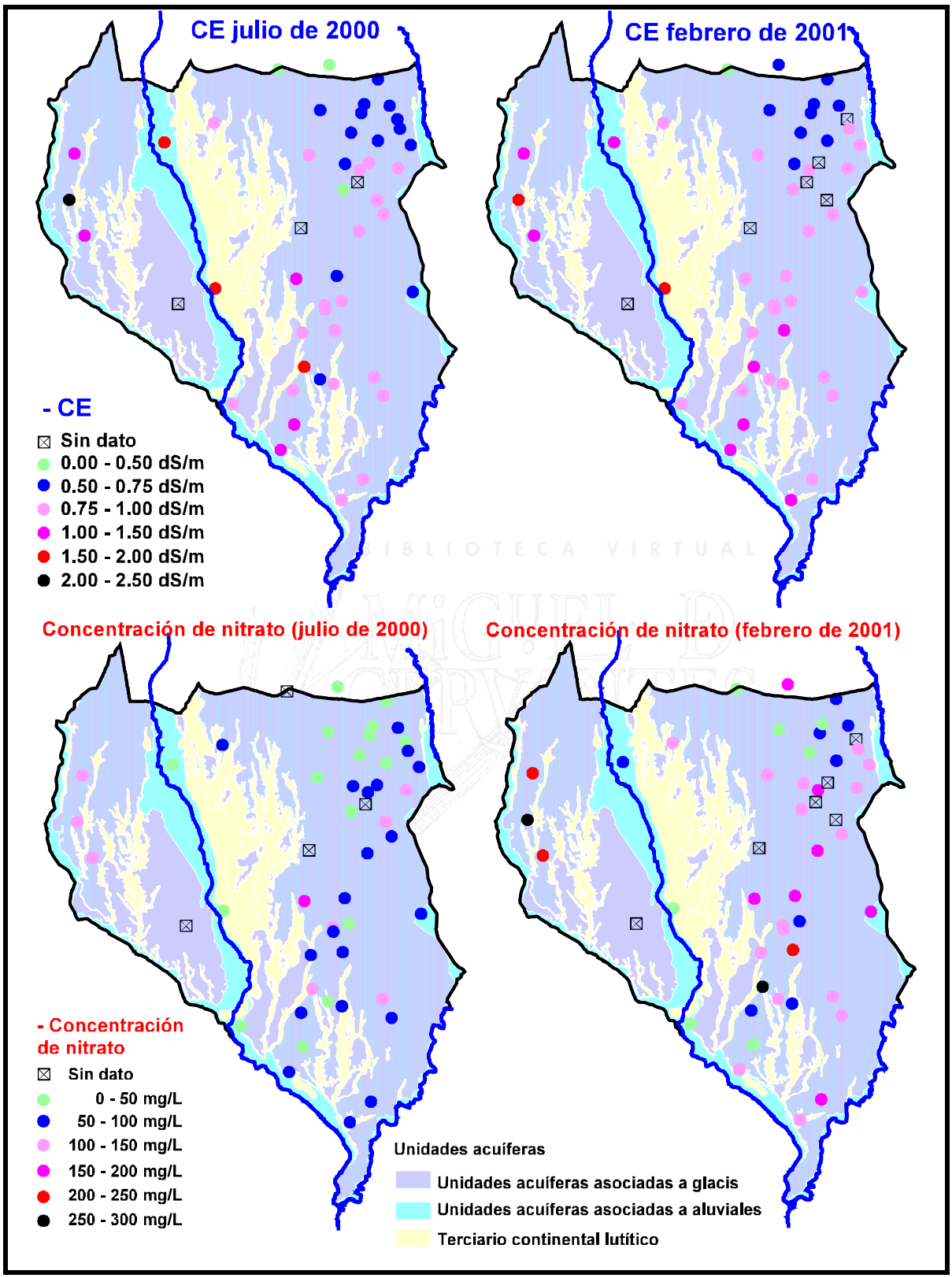


Figura 4.11. *CE* y [NO_3^-] en los 49 puntos de interés inventariados. Muestreos de julio de 2000 y febrero de 2001 sobre la cartografía de unidades acuíferas de la CR-V.

Al igual que para los desagües (Capítulo 3), los pozos del acuífero de Miraflores (margen derecha del río Riguel) también presentaron valores de *CE* y [NO_3^-] superiores a los del acuífero de Miralbueno (entre los ríos Arba y Riguel).

Dado que el Canal de Bardenas atraviesa el glacis de Miralbueno transversalmente (dirección Este-Oeste) (Fig. 4.3) y que al Norte de éste se encuentra un área de secano que ocupa el 25% de la superficie del glacis de Miralbueno (30 Km^2), la menor *CE* y [NO_3^-] del

acuífero de Miralbueno frente al de Miraflores puede atribuirse a aportes de agua de baja *CE* y [NO_3^-] procedentes principalmente de filtraciones del Canal de Bardenas y puntualmente (períodos de lluvias) a flujos subterráneos procedentes del sector Norte del acuífero.

La densidad de puntos de muestreo sobre el acuífero de Miralbueno permitió la elaboración de la cartografía de isopiezas (Fig. 4.12) y mapas de isoconductividades e isolíneas de [NO_3^-] (Fig. 4.13) en las dos fechas de muestreo.

La dirección del flujo subterráneo del acuífero de Miralbueno se establece con una componente principal hacia el Sur. El gradiente hidráulico disminuye suavemente en esa misma dirección presentando para las dos fechas estudiadas valores medios muy similares (0,85% en julio y 0,86% en febrero).

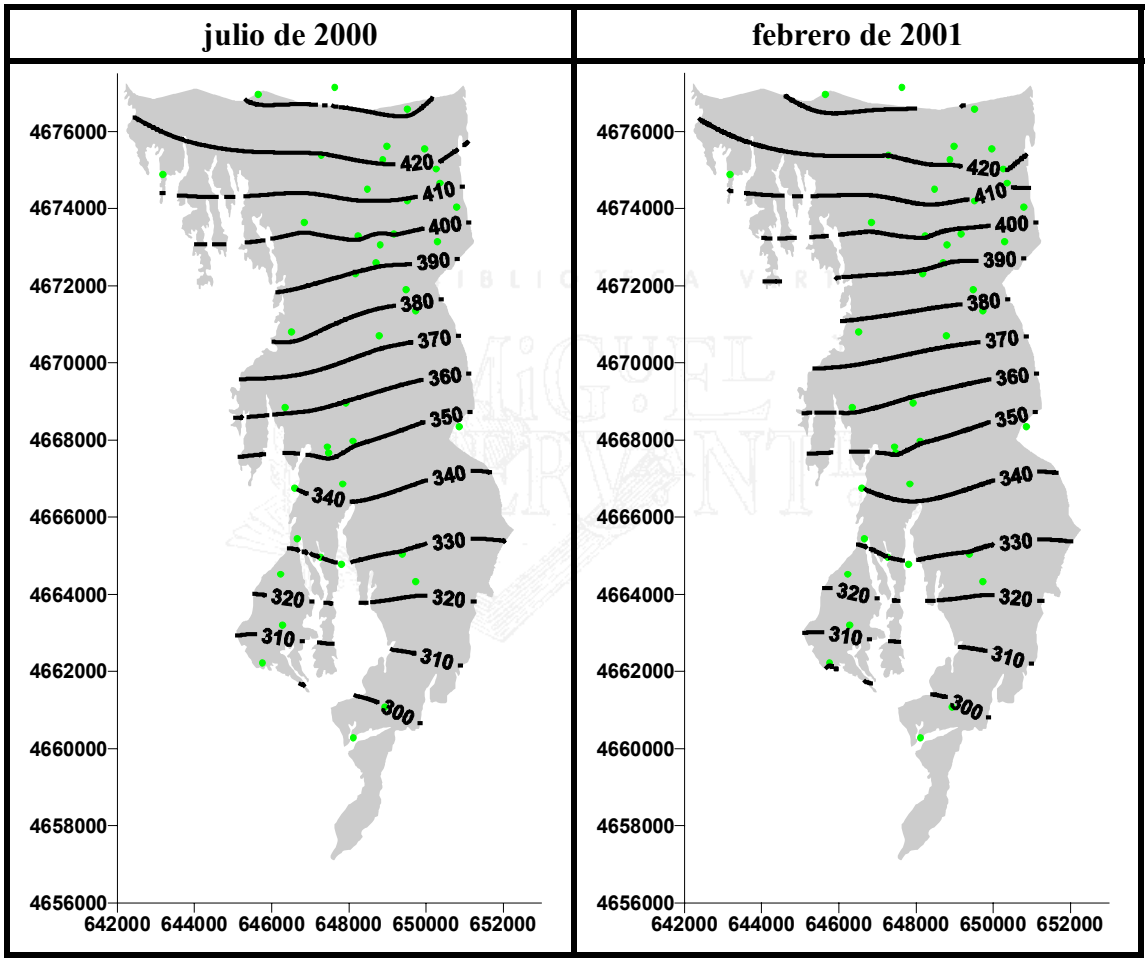


Figura 4.12. Mapas de isopiezas (msnm, equidistancia = 10 m) del acuífero de Miralbueno (julio de 2000 y febrero de 2001).

Los mapas de isolíneas de *CE* y [NO_3^-] (Fig. 4.13) muestran el incremento general de estos parámetros hacia el Sur del acuífero. La zona Norte limitada por el Canal de Bardenas presentó los valores más bajos (*CE* < 0,6 y [NO_3^-] < 50 mg/L) como consecuencia principalmente de las filtraciones del Canal antes indicadas.

La superficie que cubre los rangos más bajos de *CE* y [NO_3^-] aumenta a consecuencia del riego. En febrero (no riego), el 30% del acuífero presentó valores de *CE* menores de 0,8 dS/m frente al 46% en julio (riego). De igual modo, el porcentaje del acuífero que presentó en febrero [NO_3^-] menores de 100 mg/L fue del 27%, aumentando en el mes de julio hasta el 90%.

Se puede concluir que la salinidad del acuífero de Miralbueno es baja (el 92% del acuífero en julio y el 90% en febrero, presenta *CE* menores de 1 dS/m) mientras que la [NO_3^-] supera en gran parte del acuífero (97% en febrero y 74% en julio) el límite establecido para el consumo humano por las autoridades sanitarias (>50 mg/L).

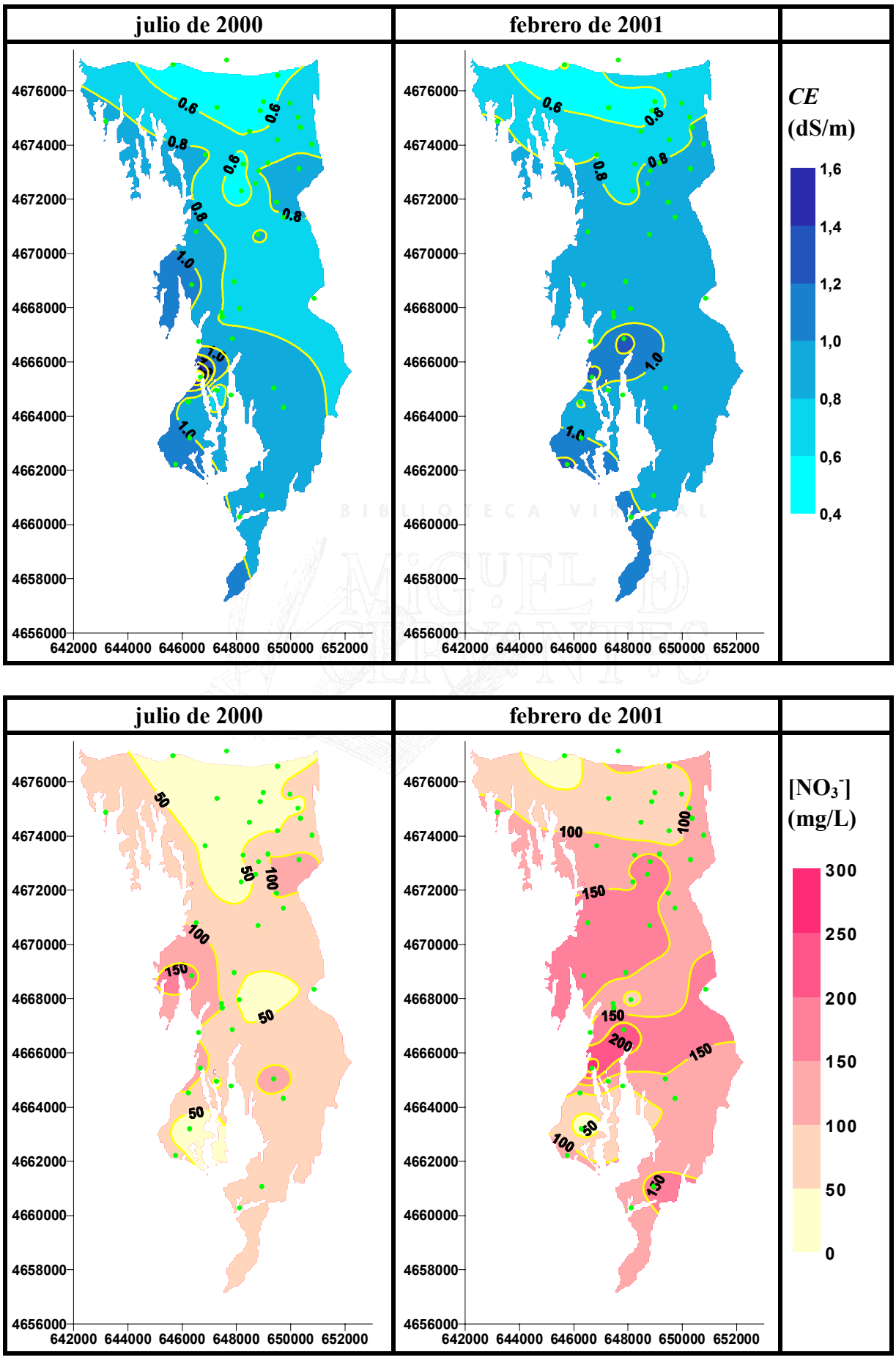


Figura 4.13. Mapas de isolíneas de *CE* (dS/m, equidistancia = 0,2 dS/m) del acuífero de Miralbueno (julio de 2000 y febrero de 2001). Mapas de isolíneas de [NO_3^-] (mg/L, equidistancia = 50 mg/L) del acuífero de Miralbueno (julio de 2000 y febrero de 2001).

El seguimiento más intensivo (frecuencia de muestreo = 21 días) de los pozos P-Biota, P-XXVI-3, P-XXX-8 y P-XXX-1, que se disponen a ambos lados del Canal de Bardenas, permitió profundizar en la evolución espacio-temporal de la piezometría, *CE* y [NO_3^-] del acuífero de Miralbueno.

Los cuatro pozos están actualmente en desuso. P-Biota se encuentra 500 metros al Norte del Canal de Bardenas. Esta zona es de regadío pero el elevado precio del agua provocado por su bombeo desde el Canal condiciona el desarrollo de cultivos con bajas necesidades de riego (cereal de invierno y girasol). P-XXVI-3 se sitúa en el borde Sur del Canal de Bardenas y alejándose de éste en dirección del flujo se encuentran P-XXX-8 y P-XXX-1.

La profundidad del nivel freático en los pozos se corresponde con la evolución del glacis. El espesor de gravas disminuye según la dirección Sur por lo que la profundidad del nivel freático disminuye en esa misma dirección (Fig. 4.14).

El ascenso del nivel freático producido por el riego es más acusado según nos alejamos del Canal de Bardenas, indicando que el efecto del riego es más intenso. Así, las mayores oscilaciones en el nivel freático se presentaron en P-XXX-1 (*CV*= 24%), seguidas de P-XXX-8 (*CV*= 18%), P-Biota-1 (*CV*= 5%) y por último de P-XXVI-3 (*CV*= 4%) (Fig. 4.14).

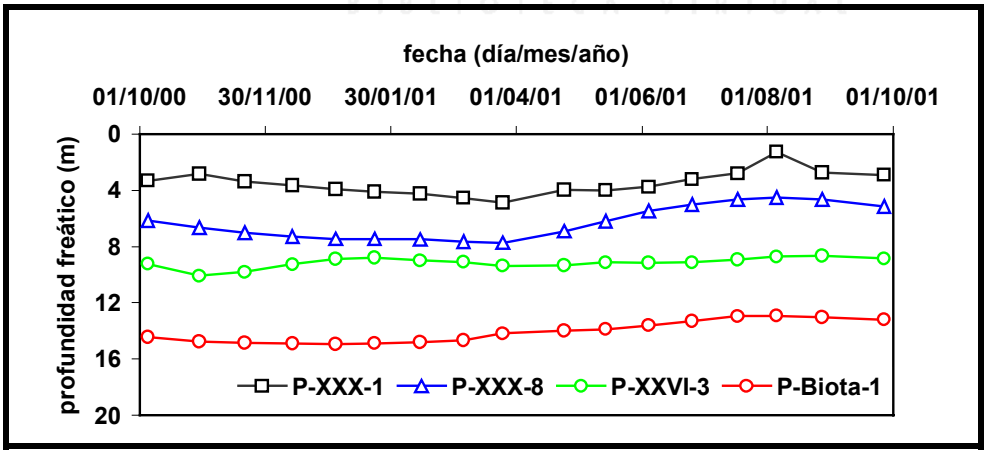


Figura 4.14. Evolución temporal de la profundidad del nivel freático en los pozos P-Biota, P-XXVI-3, P-XXX-8 y P-XXX-1 durante el año hidrológico oct-00/sept-01.

La *CE* y [NO_3^-] se comportaron de forma similar aumentando a medida que nos alejamos del Canal de Bardenas (Figs. 4.15 y 4.16). El pozo P-XXVI-3, que está muy influenciado por el flujo procedente de las filtraciones del Canal, presentó las menores *CE* (0,4 dS/m de media) y [NO_3^-] (14 mg/L de media) mientras que P-XXX-1 (pozo más alejado del Canal) presentó los mayores valores (CE_{media}= 0,7 dS/m, $[NO_3^-]_{media}$= 118 mg/L).

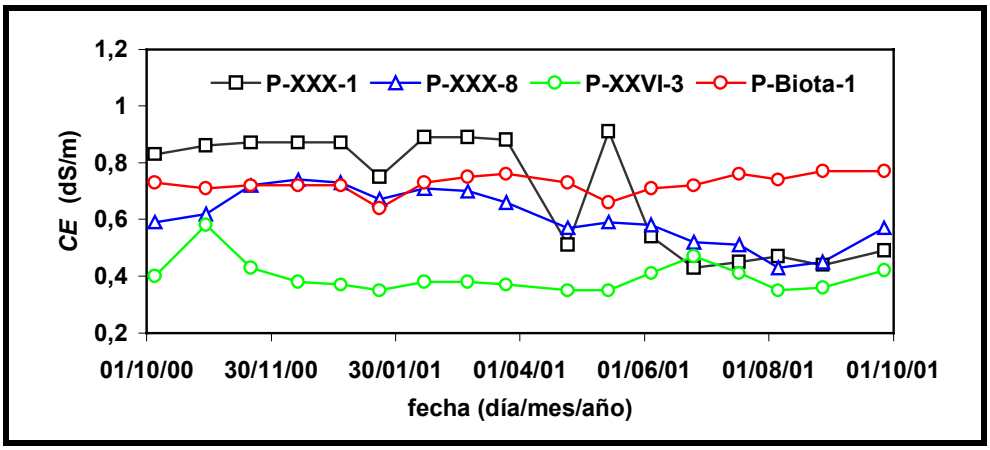


Figura 4.15. Evolución temporal de la *CE* en los pozos P-Biota, P-XXVI-3, P-XXX-8, y P-XXX-1 durante el año hidrológico oct-00/sept-01.

En primavera, con la incorporación del riego a los principales cultivos desarrollados al Sur del Canal (alfalfa y maíz), la *CE* y [NO_3^-] de P-XXX-8 y P-XXX-1 se igualó a la de P-XXVI-3 indicando los elevados volúmenes de drenaje del riego y su baja *CE* y [NO_3^-].

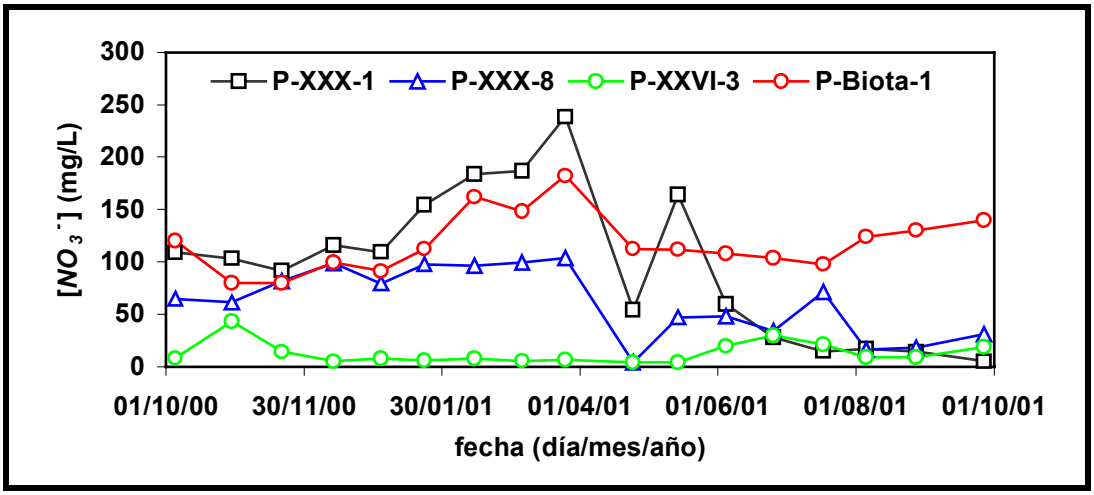


Figura 4.16. Evolución temporal de la [NO_3^-] en los pozos P-Biota, P-XXVI-3, P-XXX-8 y P-XXX-1 durante el año hidrológico oct-00/sept-01.

4.3.3 Validación de *BAS-A* en el pozo del acuífero de Miralbueno P-XXX-1

La Figura 4.17 presenta el limnigrama registrado en P-XXX-1 y el limnigrama estimado mediante la simulación con *BAS-A*. Ambos limnigramas reproducen el ciclo anual marcado por el régimen de lluvias y de riego y los ciclos secundarios correspondientes al riego de la parcela donde se sitúa el pozo P-XXX-1.

El año hidrológico comenzó con un ligero descenso del freático hasta que las intensas precipitaciones otoñales a finales de octubre de 2000 provocaron un rápido ascenso. A partir de esta época, las precipitaciones fueron escasas y por tanto incapaces de evitar la pauta descendente del acuífero que alcanza su cota más baja a finales de marzo.

Los primeros riegos aplicados, principalmente en alfalfas y huebras, provocaron un rápido ascenso en abril. Durante mayo el nivel freático permaneció estabilizado hasta que la puesta en riego del maíz en junio elevó de nuevo el nivel.

En plena campaña de riego (julio y agosto) se alcanzaron los mayores niveles con picos pronunciados cada trece días (turno de riego aproximado de la parcela de P-XXX-1) que se mantuvieron hasta mediados de septiembre (cese del riego).

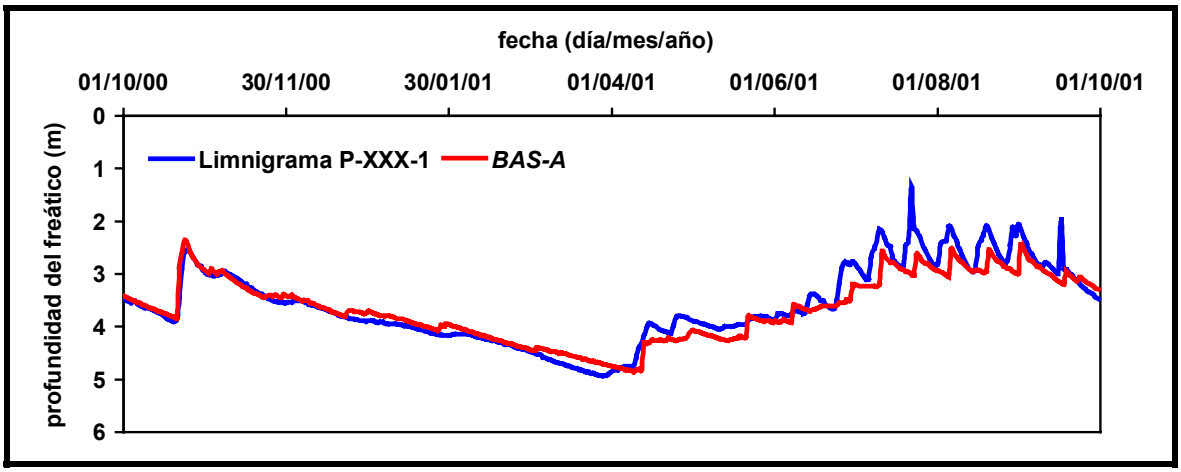


Figura 4.17. Profundidad diaria del freático (m) medida en P-XXX-1 (limnígrafo) y simulada por el programa informático *BAS-A* en el período oct-00/sep-01.

En general, el modelo simula bien la profundidad del freático medida en P-XXX-1, aunque infraestima los ascensos provocados por los turnos de riego debido a que en el efecto local únicamente ha sido considerada una parcela y a que en el riego de esta parcela se produjo un vertido directo de agua al pozo que provocó un rápido ascenso no considerado por *BAS-A*.

En base a estos resultados, se concluye que las aproximaciones consideradas en la validación son asumibles y que el programa informático *BAS-A* puede ser de gran utilidad para simular la profundidad del freático bajo distintos escenarios.

4.3.4 Simulación de escenarios en función del manejo del riego

La Figura 4.18 presenta la evolución del agua útil en el suelo de la parcela del pozo P-XXX-1 durante el ciclo del cultivo (alfalfa) bajo las condiciones de riego actual y en las condiciones de riego impuestas en los escenarios I, II, y III.

El manejo de riego actual (riego por inundación en turnos de unos trece días) provoca una mayor variabilidad en el contenido de agua útil en el suelo. Las elevadas dosis aplicadas provocan que la *CC* sea superada en la práctica totalidad de los riegos con la consiguiente percolación de agua hacia el acuífero. La excesiva duración de los turnos de riego condiciona el agotamiento del agua útil en el suelo provocando un cierto estrés hídrico en los cultivos que repercute negativamente en la productividad agrícola.

BIBLIOTECA VIRTUAL

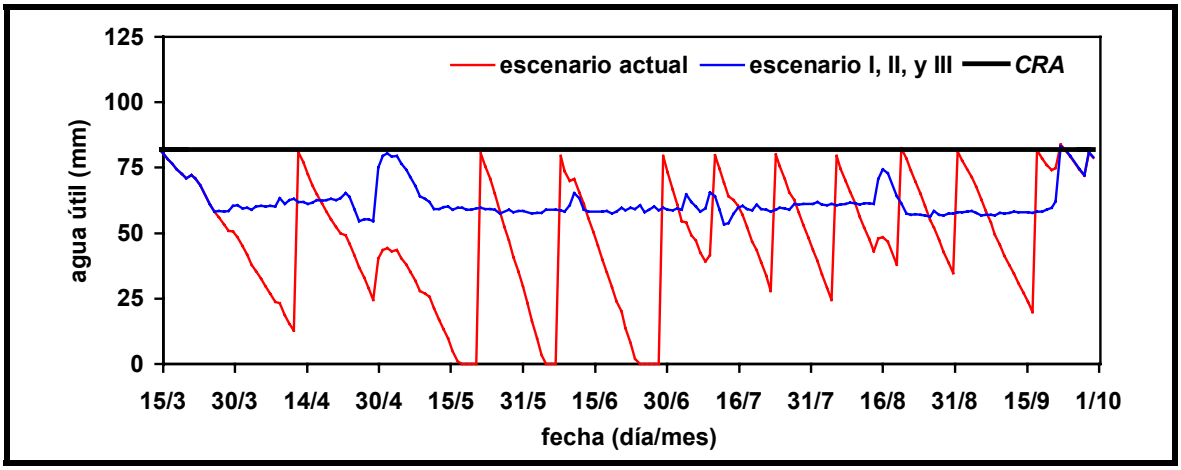


Figura 4.18. Variación del agua útil en el suelo de la parcela de alfalfa simulada por *BAS* en las condiciones de riego actual y en las condiciones de riego impuestas por los escenarios I, II, y III.

La simulación de un manejo del riego muy eficiente ($ET_R / (R+LL)$ >90%) (escenarios I, II, y III) que se aplica siempre que el agua útil en el suelo es inferior al 75% de la *CRA* mantiene el suelo con unos contenidos de agua constantes y elevados, anulando por lo tanto el estrés hídrico observado en las condiciones actuales de riego. Las condiciones de riego impuestas y las escasas lluvias durante el ciclo del cultivo provocan que el contenido de agua en el suelo no supere la capacidad de campo y, por lo tanto, la recarga del acuífero es nula durante la estación de riego. En una situación real sería necesario provocar un cierto drenaje del suelo aplicando algún riego de mayor dosis con el fin de eliminar de la zona de raíces las sales introducidas con el agua de riego.

El riego de la parcela del pozo P-XXX-1 durante el año hidrológico oct-00/sept-01 demandó un volumen de agua de 1.700 mm. Sin embargo con las condiciones de riego impuestas en el escenario I el agua de riego demandada descendería en un 59%. Además, el cambio a sistemas de riego muy eficientes, como aspersión o goteo, facilitaría optimizar la fertilización nitrogenada, fraccionando las dosis y ajustándolas a las necesidades de los cultivos, lo que reduciría el lavado de nitratos hacia el acuífero.

La Figura 4.19 presenta las variaciones del nivel freático en el pozo P-XXX-1 en el escenario actual y en los escenarios I y II. Se observa que la implantación de un sistema de riego con una eficiencia del 90% en la parcela de 8,25 ha en la que se ubica el pozo P-XXX-1

(escenario I) provoca que el ascenso del nivel freático en la época de riego no sea tan acusado como en el escenario actual con una eficiencia del riego del 45%. El riego con una eficiencia superior al 90% en la parcela de 190 ha representativa de todo el turno de riego (escenario II) anula la recarga del acuífero inducida por el riego, por lo que el descenso del freático emula la dinámica natural del acuífero en la estación de riego. Bajo estas condiciones, el acuífero podría llegar a agotarse en la época estival limitando su uso ya que los recursos subterráneos dependientes del drenaje del riego serían muy escasos.

La disminución del volumen de agua almacenada en el acuífero no solo afectaría al propio acuífero, sino que también implicaría la disminución del drenaje a través de los desagües, afectando negativamente a posibles usuarios de estas aguas por la reducción de sus volúmenes. Por el contrario, esta situación provocaría efectos ambientales positivos sobre los sistemas receptores de estos flujos, ya que disminuiría la carga contaminante (sales, nitratos y otros agroquímicos) que llegaría a los ríos Riguel, Arba y finalmente al Ebro.

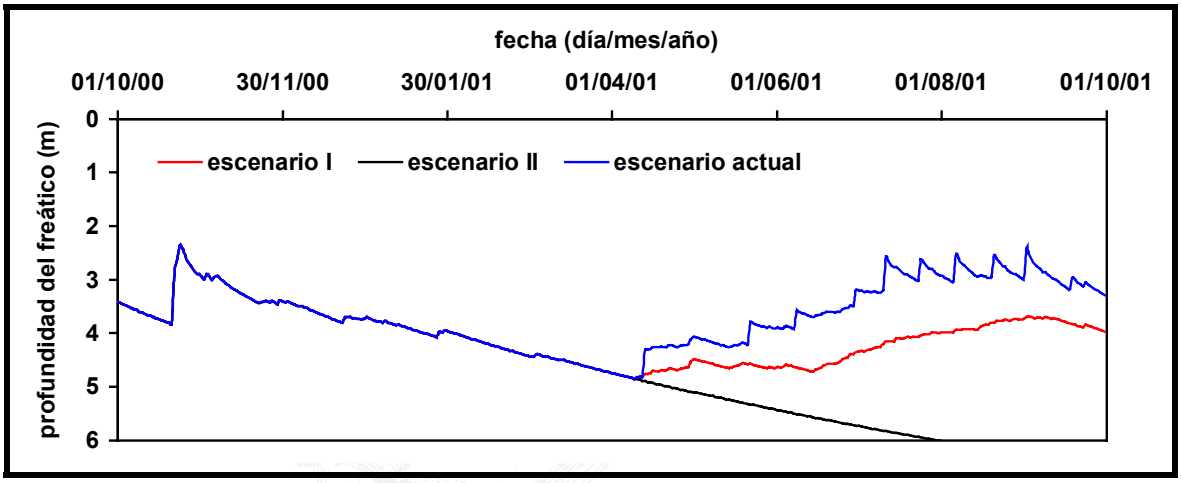


Figura 4.19. Variación del nivel freático en P-XXX-1 en la situación actual de riego (valores medidos) y bajo los escenarios I y II (valores simulados por *BAS-A*).

4.3.5 Uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas para el riego

El riego con aguas subterráneas procedentes del acuífero de Miralbueno es una estrategia posible y recomendable debido a sus bajos contenidos en sales y a sus elevados niveles de nitrato. Por ello, se ha planteado el escenario III, que simula el uso del agua subterránea para el riego eficiente (90%) de la parcela de 8,25 ha de alfalfa en la que se ubica el pozo P-XXX-1 y mantener el manejo del riego actual en el resto del turno de riego. Este escenario es altamente beneficioso, ya que conservaría más agua a cotas superiores (embalse de Yesa).

La Figura 4.20 compara el nivel freático medido en el pozo P-XXX-1 en la situación actual frente al simulado bajo el escenario III. Aunque el nivel freático en la estación de riego es sensiblemente inferior en dicho escenario debido al bombeo y extracción de agua y a la disminución de la recarga debida a la mayor eficiencia del riego, se observa que el acuífero no llega a agotarse, lo que sugiere que mediante adecuadas captaciones sería posible el uso puntual de estas aguas subterráneas.

Dado que el uso del acuífero depende de la propia recarga del riego, sería interesante incentivar el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. Estas últimas deberían estar destinadas principalmente al riego por goteo (que necesita caudales de riego bajos pero constantes) de los cultivos hortícolas (6% de la superficie del glacis de Miralbueno) que por su escaso desarrollo radicular y la excesiva duración de los turnos de riego sufren actualmente un estrés hídrico importante que merma considerablemente su rendimiento productivo. Con la estrategia de aplicación de riegos de apoyo con aguas subterráneas entre los riegos por turnos con las aguas superficiales se evitaría dicho estrés. Además, el uso de las aguas subterráneas

para el riego puntual de algunas parcelas contribuiría a aliviar los turnos de riego de las acequias, lo que favorecería al conjunto de las parcelas que componen el turno de riego.

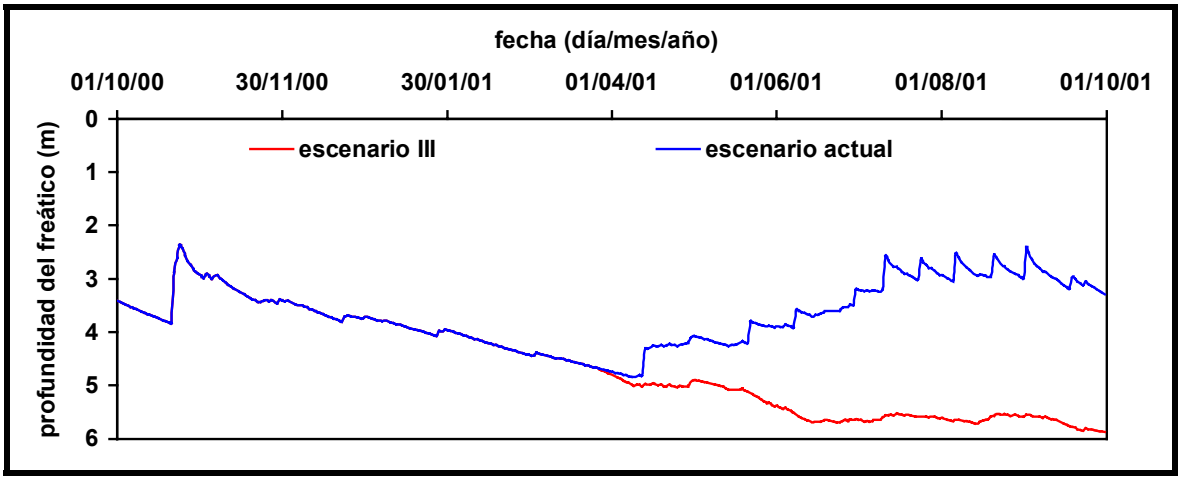


Figura 4.20. Variación del nivel freático en P-XXX-1 en la situación actual de riego (valores medidos) y bajo el escenario III (valores simulados por *BAS-A*).

La dosis de nitrógeno que se podría aportar mediante el riego exclusivo con aguas subterráneas del acuífero de Miralbueno (dosis de riego de 700 mm y $[NO_3^-]_{media}$= 60 mg/L) sería de unos 100 Kg N/ha, lo que cubriría una parte considerable de las necesidades de los cultivos (aproximadamente una tercera parte de las recomendaciones de N para el maíz o casi la mitad de los cultivos hortícolas) y con una distribución más homogénea a lo largo del ciclo.

El uso de las aguas subterráneas para el riego no solo supondría un ahorro en fertilizantes para el agricultor sino que además la absorción del nitrato por los cultivos evitaría que llegase a los cursos fluviales receptores de los flujos de drenaje.

4.4 CONCLUSIONES

- ✓ Las unidades acuíferas de la CR-V están constituidas por depósitos cuaternarios. La explotación de los recursos subterráneos es moderada-baja y está concentrada mayoritariamente en el acuífero de Miralbueno para uso ganadero y agrícola.

- ✓ El acuífero de Miraflores y el aluvial del Riguel presentan valores de *CE* y [NO_3^-] mayores que el acuífero de Miralbueno ya que en este último se produce un efecto de dilución derivado de su recarga por filtraciones del Canal de Bardenas, cuyas aguas tienen valores muy bajos de *CE* y [NO_3^-].

- ✓ Las aguas subterráneas del acuífero de Miralbueno circulan según un gradiente hidráulico del 0,85% a favor de una componente principal de dirección Sur. No presentan problemas de salinidad (el 92% de la superficie del acuífero en julio y el 90% en febrero presentan *CE* menores de 1 dS/m) pero tienen elevados valores de [NO_3^-] (el 97% de la superficie del acuífero en febrero y el 74% en julio superan el límite de 50 mg/L).

- ✓ El nivel freático de las aguas subterráneas en primavera y verano depende del riego. Los riegos ineficientes provocan elevados flujos de percolación profunda de baja salinidad y [NO_3^-] que recargan los acuíferos, elevan sus niveles freáticos y diluyen las sales y nitratos presentes en las aguas subterráneas.

- ✓ Los cambios de cultivos, del manejo del riego y/o del uso que se haga de las aguas subterráneas pueden alterar la dinámica y calidad tanto de los acuíferos como de los desagües y ríos que los drenan.

- ✓ A lo largo de la dirección del flujo Norte-Sur de las aguas subterráneas disminuye la profundidad del nivel freático del acuífero de Miralbueno y aumenta la *CE* y [NO_3^-] de sus aguas. La variabilidad de estos parámetros también aumenta hacia el Sur del acuífero.

- ✓ El programa *BAS-A* se ha constituido como una herramienta válida a la hora de predecir el comportamiento hidrológico del acuífero de Miralbueno en distintos escenarios.

- ✓ El cambio hacia sistemas de riego más eficientes y la utilización puntual para el riego de las aguas subterráneas puede ser altamente beneficiosa para eliminar el estrés hídrico de los cultivos, conservar el agua en el embalse de Yesa y mejorar la calidad del agua de los ríos receptores de las aguas de drenaje.

- ✓ Estos escenarios de incremento en la eficiencia del riego y del riego con aguas subterráneas disminuirían los recursos hídricos, tanto en el propio acuífero como en los cursos fluviales receptores de su drenaje. Por ello, ante estos escenarios se deben estudiar las posibles afecciones a otros usuarios de los acuíferos y ríos receptores de los flujos de retorno del regadío.

5. ANÁLISIS DE CUENCAS EXPERIMENTALES

BIBLIOTECA VIRTUAL

5.1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En este capítulo se realiza un estudio de tres cuencas piloto en la Comunidad de Regantes nº V (CR-V). La metodología de trabajo se basa en la elaboración de balances de agua, sales y nitrógeno mediante la medición o estimación de las principales entradas y salidas en las cuencas piloto durante el año hidrológico oct-00/sept-01 (año hidrológico 2001).

Esta metodología es un medio eficiente de diagnóstico y control del territorio que se utiliza en numerosos países. Así, El Din El Quosy (1990) describe una red de control compuesta por 100 estaciones cuyo objetivo es obtener datos de salinidad y caudal que sean fiables y continuos para supervisar la cantidad y calidad del agua de drenaje en el Delta del Nilo.

En nuestro país, la Comunidad Autónoma de Navarra ha implementado en los últimos años una red de cuencas experimentales agrarias (Donezar y del Valle de Lersundi, 2001) para dar respuesta a la necesidad de disponer información local sobre los arrastres por las aguas de escorrentía de sólidos en suspensión (sedimentos) y de sustancias en disolución (abonos orgánicos e inorgánicos, sales, productos fitosanitarios, purines) derivadas de la actividad agraria.

La realización de este tipo de estudios en diferentes zonas puede mostrar resultados cuyo balance de sales sea positivo (disolución de sales), negativo (acumulación de sales) e incluso positivo para unos iones y negativo para otros.

Así, Tanji *et al*. (1975) en un estudio realizado cerca de Sacramento, USA, estimaron que la masa de sales exportada en el drenaje era tres veces mayor a la contenida en el agua de riego. La mayor fuente de sales (70%) procedía de capas salinas colgadas compuestas principalmente por cloruro sódico. El análisis puso de manifiesto el peligro de considerar únicamente los flujos superficiales de entrada y salida de agua en una zona de regadío, puesto que en este caso, la calidad y cantidad de los flujos de retorno dependían principalmente de las aguas subterráneas.

Sin embargo, Bingham *et al*. (1971) en un estudio realizado cerca de Riverside, California (USA), evidenciaron un balance de sales negativo (acumulación de sales en los suelos) para la mayor parte de los tres años de duración del estudio. Sus datos indicaron que el lavado ocurría en los meses de invierno y la acumulación de sales en los suelos se daba en la estación de riego. El balance negativo fue debido principalmente a la precipitación de yeso y carbonato cálcico en los suelos.

Por otro lado, Kaddah y Rhoades (1976) encontraron un balance negativo para los iones calcio, bicarbonato y sulfato y un balance positivo, o lavado de sales del perfil del suelo, para el cloruro, magnesio y sodio.

En Aragón, se han desarrollado diversos proyectos de investigación basados en el estudio de cuencas agrarias de regadío como Valfarta en Monegros II (Aragüés *et al.*, 1998) o La Violada en Monegros I (Isidoro, 1999). Los resultados de estos estudios relacionan la cantidad y calidad (salinidad y concentración en nitrato) de los flujos de retorno de los regadíos con el medio físico y el manejo agronómico (principalmente del riego y fertilización nitrogenada) desarrollado en cada zona de estudio.

Aragüés *et al*. (1998) en balances anuales realizados en dos cuencas de Monegros II con fracciones de lavado inferiores al 10%, y presencia de horizontes de lutitas salinas encontraron una masa media de sales exportadas de 13,5 t/ha/año y una masa media de nitrógeno exportado de 35 kg/ha/año.

Isidoro (1999) en balances efectuados en el polígono de riego de la Violada con fracciones de lavado en torno al 50% y presencia de yeso en los suelos encontró una masa media de sales exportadas en sus dos años de estudio de 16 t/ha/año y una masa de nitrógeno cercana a 70 Kg/ha/año.

El área de estudio del presente trabajo se incluye dentro del estudio realizado por Basso (1994) en el polígono de riegos de Bardenas I, donde estimó la masa de nitrógeno exportada por hectárea en 15 colectores de drenaje obteniendo un valor medio a lo largo de tres años hidrológicos de 35,5 Kg N/ha/año que representaron el 16% del nitrógeno aplicado en los abonos.

El contraste entre las tres cuencas piloto del presente trabajo y de éstas con otras cuencas agrarias estudiadas en anteriores trabajos detecta la influencia de los factores climáticos, geológicos y agronómicos, permitiendo establecer recomendaciones para la CR-V que optimicen los insumos de producción minimizando los efectos medioambientales negativos.

Objetivos:

- ✓ Ampliar el conocimiento de los procesos básicos relacionados con los recursos hídricos que intervienen en el sistema agrario.
- ✓ Cuantificar la cantidad (volumen de agua, y masa de sales y nitrógeno) y calidad (concentración en sales y nitrato) de los flujos de retorno del regadío en las tres cuencas piloto.
- ✓ Identificar las principales ineficiencias en el manejo de los insumos de producción (agua y nitrógeno) y efectuar recomendaciones capaces de optimizar dicho manejo y minimizar la exportación de sales y nitratos en las aguas de drenaje de las cuencas estudiadas.

5.2 MATERIALES Y MÉTODOS

5.2.1 Cuencas piloto: Descripción y caracterización

En base a los datos obtenidos en los capítulos anteriores, se seleccionaron tres cuencas representativas del medio físico y manejo agronómico realizado en la CR-V. Las cuencas seleccionadas (C-XIX-6, C-XXV-3 y C-XXX-3) son parte de las drenadas por los desagües D-XIX-6, D-XXV-3 y D-XXX-3, (Fig. 5.1) y sus aguas de drenaje en los puntos de salida (puntos de control) se incluyen en los tres grupos más importantes de los tipos de agua discriminados en los desagües (Capitulo 3), lo que confirma su validez como cuencas representativas de la variabilidad espacial existente en la CR-V.

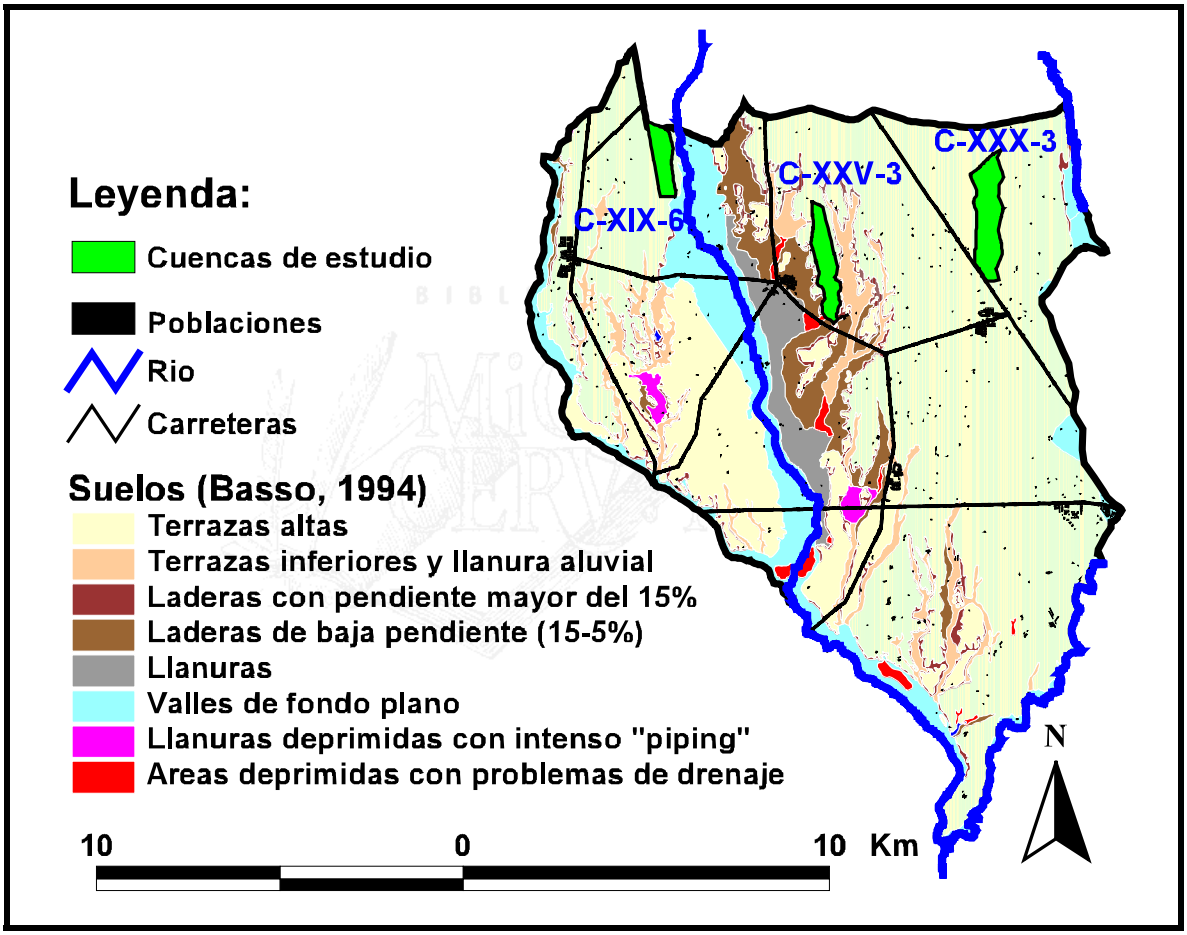


Figura 5.1. Localización de las cuencas seleccionadas (C-XIX-6, C-XXV-3 y C-XXX-3) sobre la cartografía de suelos de la CR-V (Basso, 1994).

Los límites de las cuencas que drena cada desagüe se seleccionaron según las divisorias de aguas superficiales (Fig. 5.2) que coinciden en su mayoría con las acequias principales que suministran el agua de riego. Las áreas seleccionadas están aisladas de escorrentías superficiales exteriores, y las escorrentías superficiales generadas por el riego y las precipitaciones de la propia cuenca son drenadas por el correspondiente desagüe.

Las características geológicas de la CR-V no permiten obtener una buena delimitación subsuperficial de las cuencas hidrológicas, por lo que además de conocer el drenaje superficial a través de los desagües (estaciones de control, Fig. 5.2), resulta imprescindible una buena estimación de los flujos laterales subterráneos.

Las tres cuencas reciben aportes subterráneos del exterior según una componente principal de dirección Norte-Sur (Capítulo 4). Los aportes recibidos por C-XIX-6 tienen su origen en el riego y las precipitaciones al Norte de la cuenca mientras que C-XXV-3 y C-XXX-3 reciben, además de los aportes de las cuencas superiores, filtraciones del Canal de las Bardenas (Capítulo 3).

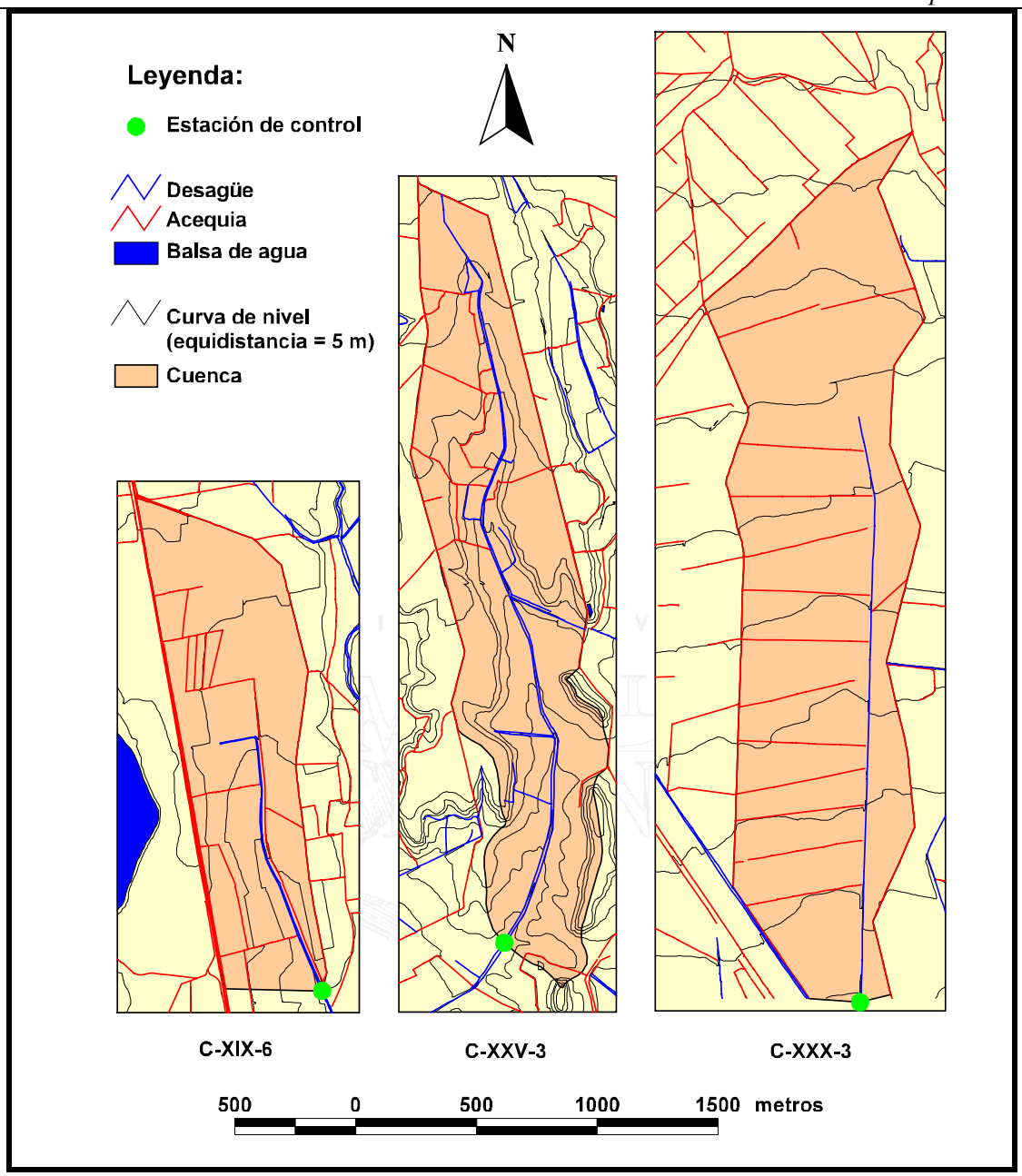


Figura 5.2. Delimitación de las cuencas hidrológicas C-XIX-6, C-XXV-3 y C-XXX-3.

Las cuencas C-XIX-6 y C-XXV-3 se extienden desde glacis colgados hacia valles que penetran en materiales del terciario continental. El tramo final de D-XIX-6 y D-XXV-3 se incrusta en lutitas impermeables y por ello estos desagües son capaces de drenar la práctica totalidad del flujo subterráneo (Fig. 5.3A).

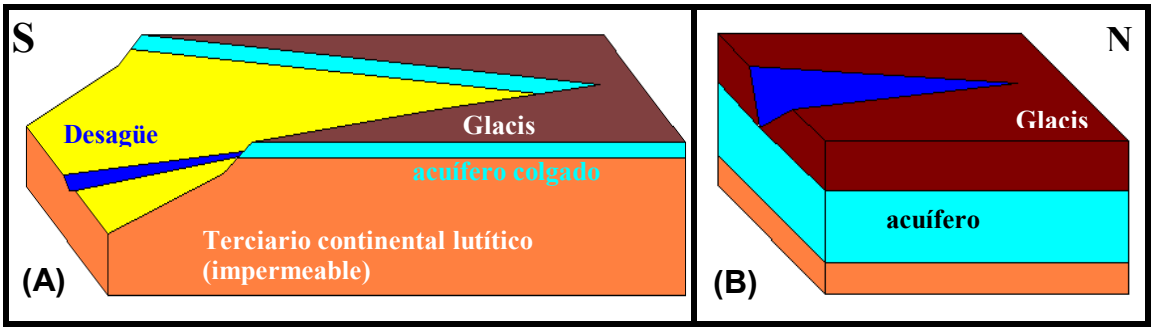


Figura 5.3. Estructura hidrogeológica de las cuencas (A) C-XIX-6 y C-XXV-3 y (B) C-XXX-3.

Por el contrario, en la cuenca C-XXX-3, situada íntegramente sobre el acuífero de Miralbueno, su desagüe principal (D-XXX-3) incide solo parcialmente en las gravas cuaternarias del glacis, no siendo capaz de drenar todo el flujo subterráneo (Fig. 5.3B).

En cada una de las tres cuencas, se realizó un seguimiento agronómico detallado durante el período de estudio (oct-00/sept-01). La información se obtuvo mediante la realización de encuestas telefónicas para cada superficie perteneciente a un mismo propietario, que riega por una misma acequia y que tiene un mismo cultivo (*UPRC*). Se encuestó a los 45 agricultores propietarios de las 74 *UPRC* que componen la totalidad de las tres cuencas. En las encuestas (Anejo 1) se recabó información sobre la fecha de siembra, la fertilización nitrogenada y el rendimiento productivo de los cultivos.

Además se realizó la cartografía de cultivos, suelos y sistemas de riego, que se introdujo en el sistema de información geográfica ARCINFO.

5.2.2 Balance de agua

El balance de agua del año hidrológico 2001 se ha obtenido integrando los balances desarrollados en los dos subsistemas que componen la cuenca (subsistema suelo y subsistema acuífero). El subsistema suelo comprende desde la superficie topográfica hasta la profundidad efectiva del suelo que está limitada por la profundidad máxima de desarrollo radicular. El subsistema acuífero comprende desde la profundidad efectiva del suelo hasta el nivel impermeable terciario.

5.2.2.1 Balance de agua en el suelo

El balance de agua anual en el suelo de las cuencas se ha obtenido integrando los balances diarios de agua en el suelo de todas sus *UPRC* y de la superficie no regada (caminos, eriales, barbechos...). La ecuación correspondiente a cada *UPRC* obedece a:

$$VS = [R+LL] - [ET_R+D],$$

donde la variación de agua en el suelo (*VS*) es igual a la diferencia entre las entradas (*R*= riego, *LL*= lluvia) y las salidas (ET_R= evapotranspiración real, *D*= drenaje) de agua en el suelo.

Para estimar diariamente los componentes del balance de agua se desarrolló el programa informático *BAS* (Balance Agua Suelo) que modela los flujos de agua en el suelo asumiendo una serie de aproximaciones que simplifican la realidad, facilitan los cálculos y son compatibles con los objetivos del estudio y la precisión del resto de los datos manejados.

Descripción del programa BAS

Las variables de entrada a *BAS* son: (1) los datos meteorológicos diarios de precipitación, temperatura y evapotranspiración de referencia, (2) los parámetros de los suelos capacidad de campo, punto de marchitez y humedad inicial del suelo y (3) los datos agronómicos de dosis de riego diaria, fecha de siembra, temperatura base y grados-día acumulados para alcanzar los distintos estadios fenológicos en cada cultivo.

El programa calcula la evapotranspiración potencial del cultivo (*ETc*) a partir de la evapotranspiración de referencia (ET_0) y del coeficiente de cultivo (*Kc*):

$$ETc = ET_0 \cdot Kc$$

BAS estima diariamente los coeficientes de cultivo (*Kc*) a partir de la fecha de siembra, de la temperatura base y de los grados-día acumulados para definir las cuatro fases del ciclo de los cultivos herbáceos recomendadas por Allen *et al*. (1998) en función del estado de desarrollo. El programa calcula los grados-día acumulados a partir del día de siembra sumando la temperatura media diaria cuando ésta supera la temperatura base del cultivo en cuestión. El *Kc* de la Fase I (*Kc* inicial), que se considera constante, depende de la humedad de la superficie del suelo y se calcula en función de la frecuencia de lluvias y riegos y la evapotranspiración de referencia. Durante la fase de desarrollo (Fase II) el *Kc* se incrementa linealmente hasta

alcanzar un máximo (*Kc* medio) cuando el cultivo alcanza la cobertura completa del suelo (Fase III). Con la fase de maduración (Fase IV) el *Kc* decrece linealmente hasta el último día del ciclo del cultivo (*Kc* final). Conocidos los grados-día acumulados desde la siembra, que definen cada una de estas fases, *BAS* aplica el *Kc* correspondiente a la fase en que se encuentra el cultivo.

Durante los períodos sin cultivo *BAS* utiliza el coeficiente correspondiente a cada mes para suelo desnudo siguiendo la metodología propuesta por Allen *et al.* (1998), que depende del régimen de precipitaciones y de la evapotranspiración de referencia.

El procedimiento de cálculo se basa en la suma de las entradas de agua al suelo (precipitación y riego) y el consiguiente incremento de su humedad (Fig. 5.4). El programa considera que la totalidad de los volúmenes aplicados por el riego y la lluvia se infiltran en el suelo. Esto es, la escorrentía superficial y la evaporación directa de la lluvia (*LL*) y el riego (*R*) no se ha considerado en el programa aún sabiendo que una pequeña parte de las dosis de riego por inundación puede escurrir superficialmente hacia los desagües y que la evaporación y arrastre en el caso del riego por aspersión puede ser importante, sobre todo en el caso de que exista viento (Faci y Bercero, 1991).

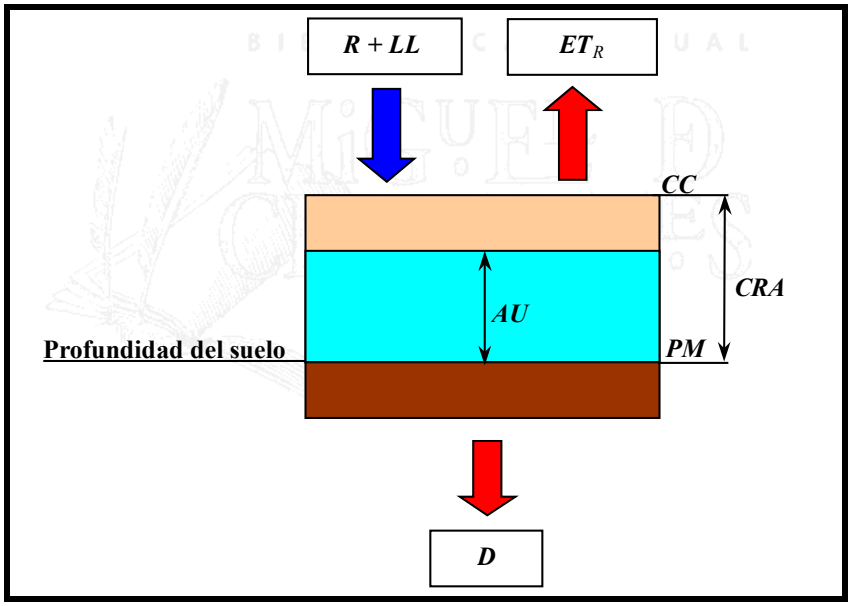


Fig. 5.4. Diagrama de flujos en el subsistema suelo (*R*= riego; *LL*= lluvia; *CC*= capacidad de campo; *PM*= punto de marchitez; *CRA*= capacidad de retención de agua; *AU*= agua útil para las plantas; ET_R= evapotranspiración real; *D*= drenaje).

El agua útil para las plantas (*AU*) se calcula como la diferencia entre el contenido de agua del suelo y el contenido de agua a punto de marchitez (*PM*). Si la *ETc* es menor o igual que *AU*, la evapotranspiración real (ET_R) es igual a la potencial del cultivo (*ETc*) y el contenido de agua en el suelo disminuye en un valor igual a la *ETc*. Si la *ETc* es mayor que *AU*, la evapotranspiración real (ET_R) es igual a *AU*, quedando en este caso el suelo con un contenido de humedad igual a *PM*.

El valor del drenaje (*D*) depende del contenido de agua del suelo. Si el contenido de agua del suelo es menor que el contenido de agua a capacidad de campo (*CC*), no se produce drenaje mientras que en el caso de que sea mayor, el drenaje es la diferencia entre el contenido de agua en el suelo y el contenido de agua a capacidad de campo.

Entradas al programa BAS

Los volúmenes de agua de riego se tomaron de la base de datos de la CR-V cuyo personal mide el volumen de riego a partir de los aforadores construidos en la cabecera de cada acequia y del tiempo de riego de cada *UPRC*. Así pues, se obtuvieron volúmenes de riego diarios para todas las *UPRC* que componen la cuenca. En las *UPRC* que no están íntegramente

incluidas en la cuenca estudiada, el volumen de riego se ponderó por la superficie perteneciente a la cuenca (extraída de la cartografía digital elaborada, SIG). La precipitación diaria se midió en el pluviómetro de la estación meteorológica automática CR10-Ejea, instalada para este trabajo en el centro geográfico de la CR-V.

El programa considera que la totalidad de los volúmenes aplicados por el riego y la lluvia se infiltran en el suelo. Esta aproximación se considera razonable en las tres cuencas estudiadas, dado que la topografía es prácticamente horizontal, el terreno está parcelado, y los suelos son muy permeables, por lo que las escorrentías superficiales son mínimas frente al volumen infiltrado.

La evapotranspiración de referencia (ET_0) se calculó mediante el método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) a partir de los datos climáticos diarios registrados en la estación meteorológica CR10-Ejea. Las fechas de siembra de cada *UPRC* se tomaron de las encuestas realizadas a los agricultores. Los valores de *Kc* se obtuvieron de Martinez-Cob *et al.* (1998). En la Tabla 5.1 se presentan los valores de *Kc* junto con la temperatura base (*TB*) y grados-día acumulados (integral térmica, *IT*) para cada cultivo en sus distintos estados de desarrollo (Martínez-Cob, comunicación personal).

Tabla 5.1. Coeficientes de cultivo (*Kc*), temperatura base (*TB*, ºC) e integral térmica (*IT*, ºC) para los principales cultivos de las cuencas de estudio (Martínez-Cob, comunicación personal).

	CULTIVOS							
	alfalfa	**arroz**	**cebolla**	**girasol**	**maíz**	**pimiento**	**tomate**	**trigo**
				Kc				
Inicial	0,89	1,15	0,25	0,25	0,26	0,24	0,26	0,81
Medio	0,89	1,23	1,08	1,19	1,23	1,07	1,18	1,17
Final	0,89	0,92	0,76	0,36	0,34	0,9	0,9	0,27
				***TB* (ºC)**				
	5	10	4	6	8	10	10	0
				***I.T.* (ºC)**				
FASE I	-	220	410	320	260	250	190	260
FASE II	-	960	1.270	860	745	730	610	660
FASE III	-	1.330	2.420	1.810	1.755	1.530	1.460	1.690
FASE IV	2.855	1.450	2.950	2.150	1.975	1.650	1.600	2.200

La ejecución del programa *BAS* exige introducir el valor de la humedad inicial del suelo (1 de octubre de 2000) que por ser desconocido fue introducido como *PM* + [(*CC*-*PM*)/2]. Evidentemente, la variación de agua entre el estado inicial y final del balance anual realizado (entre el 1 de octubre de 2000 y el 30 de septiembre de 2001) está condicionada por el valor de humedad ficticio introducido el 1 de octubre de 2000. No obstante, la humedad del suelo a partir del 21 de octubre de 2.000 simula a la real ya que las intensas precipitaciones de ese día situaron a todos los suelos en capacidad de campo.

Los parámetros hidráulicos (*CC y PM*) introducidos en cada *UPRC* dependen del tipo de suelo, diferenciándose en las cuencas de estudio dos clases, sasos y valles, cuyos parámetros hidráulicos se presentan en la Tabla 5.2.

La capacidad de retención de agua (*CRA*) de 60 mm obtenida para los suelos de saso en el estudio edafológico (Capítulo 2) puede estar infraestimada debido a que la metodología utilizada en su determinación no tuvo en cuenta: a) la capacidad de almacenamiento de agua en la estructura inalterada del suelo (cavidades de origen biológico y huecos formados por los elementos gruesos), b) la posibilidad de que las raíces atraviesen el petrocálcico, y c) la posibilidad de extracción de agua de algunas plantas por debajo de los 15 bares (presión a la

que se obtiene el punto de marchitez). Por ello, el contenido de agua medio a *PM* y *CC* obtenido para los suelos de saso en el estudio edafológico se modificó hasta alcanzar una *CRA* un 40% mayor (*CRA*= 85 mm). Esta decisión está justificada por los buenos rendimientos obtenidos en la zona. Por ejemplo, frecuencias de riego de 13 días en suelos con una *CRA* de 60 mm producirían un severo estrés hídrico en el maíz, lo que implicaría unos rendimientos inferiores a los 11.000 Kg/ha obtenidos en las encuestas.

Los valores del contenido de agua a *CC* y *PM* para los suelos de valle han sido obtenidos del análisis de una muestra tomada en C-XXV-3 mediante la metodología utilizada en el estudio edafológico de la CR-V (Capítulo 2). Estos valores son muy similares a los obtenidos para los suelos de aluvial del conjunto de la CR-V (Capítulo 2).

Tabla 5.2. Contenido de agua en el suelo a punto de marchitez (*PM*), capacidad de campo (*CC*) y capacidad de retención de agua utilizable por las plantas (*CRA*) para los dos tipos de suelos diferenciados en las cuencas de estudio.

Suelo	*PM* (mm)	*CC* (mm)	*CRA* (mm)
Saso	168	253	85
Valle	269	445	176

Se ha supuesto que el punto de marchitez no varía para los distintos cultivos, ni durante el ciclo vegetativo de estos, considerándose la profundidad a la que es capaz de extraer agua una planta (profundidad efectiva) como un valor fijo determinado únicamente por el tipo de suelo. Igualmente se ha supuesto que las *UPRC* están perfectamente cultivadas y las plantas tienen un desarrollo óptimo sin estar afectadas por estreses bióticos o abióticos (excepto el estrés hídrico) que pudieran disminuir su evapotranspiración potencial (ET_C).

Índices de manejo del agua

Para evaluar el uso del agua en las cuencas se han calculado en cada *UPRC* y durante el ciclo vegetativo de los cultivos los índices de Eficiencia del Uso Consuntivo del Agua (*EUCA*) y el Déficit Hídrico (*DH*).

La *EUCA* se define como el porcentaje de agua realmente evapotranspirada (ET_R) por los cultivos sobre el agua total disponible para dicha evapotranspiración (riego-*R*, lluvia-*LL* y agua útil-$AU_{inicial}$ presente en el suelo al inicio del ciclo vegetativo). Este índice hace referencia al grado de aprovechamiento del agua por los cultivos.

$$EUCA = \frac{ET_R}{\left(R + LL + AU_{inicial}\right)} \cdot 100$$

El *DH* se define como el porcentaje de agua potencialmente evapotranspirable y que no lo hizo por la ausencia de agua útil en el suelo, sobre el agua potencialmente evapotranspirable. El *DH* evalúa en qué grado los recursos hídricos (riego, lluvia y agua útil inicial almacenada en el suelo) han sido capaces de satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos.

$$DH = \frac{ET_C - ET_R}{ET_C} \cdot 100$$

Finalmente, se calculó la fracción de drenaje (*FD*) en el año de estudio, definida como el volumen de agua drenado (*D*) respecto a los recursos hídricos disponibles para las plantas (riego, lluvia y agua útil almacenada en el suelo el 1 de octubre de 2000)

$$FD = \frac{D}{\left(R + LL + AU_{01/10/00}\right)} \cdot 100$$

Estos índices dependen de factores naturales (clima y suelo) y antrópicos. Si las lluvias no superan la capacidad de campo de los suelos (drenaje nulo) y no son importantes en los últimos días del ciclo del cultivo, un manejo "ideal" del riego permitiría obtener una *EUCA* del 100% y un *DH* nulo.

5.2.2.2 Balance de agua en el sistema acuífero

En el sistema acuífero se ha realizado un balance de agua para el año hidrológico 2001 que responde a la ecuación: $VA = [FSE + D] - [DSP + DSB]$, donde la variación de agua en el sistema acuífero (*VA*) es igual a las entradas (*FSE*= flujo subterráneo entrante, *D*= drenaje propio del suelo) menos las salidas (*DSP*= drenaje superficial, *DSB*= drenaje subterráneo) del sistema acuífero (Fig. 5.5).

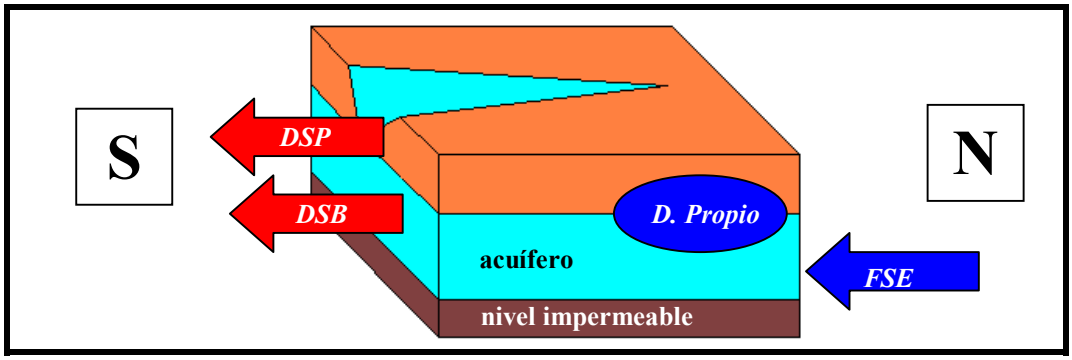


Figura 5.5. Diagrama de flujos en el subsistema acuífero (*D*= drenaje generado en la propia cuenca; *FSE*= flujo subterráneo entrante; *DSP*= drenaje superficial y *DSB*= drenaje subterráneo).

Para determinar las salidas por drenaje superficial se construyeron estaciones de control en el punto final de cada uno de los tres desagües que drenan las cuencas. Estas estaciones o puntos de control se ubicaron en lugares accesibles, lejos de la influencia de estructuras que pudieran alterar el régimen hídrico de los desagües (puentes, tajaderas...). La función de las estaciones de control fue la medida de la altura de agua para la determinación posterior del caudal y la toma automática de muestras de agua. Para la determinación del caudal se construyó una sección cementada en el desagüe de 0,8 m de ancho, en la que se instaló un aforador de resalte de solera y una regla graduada que permitió la lectura de la altura de agua en el medidor. (Fig. 5.6).

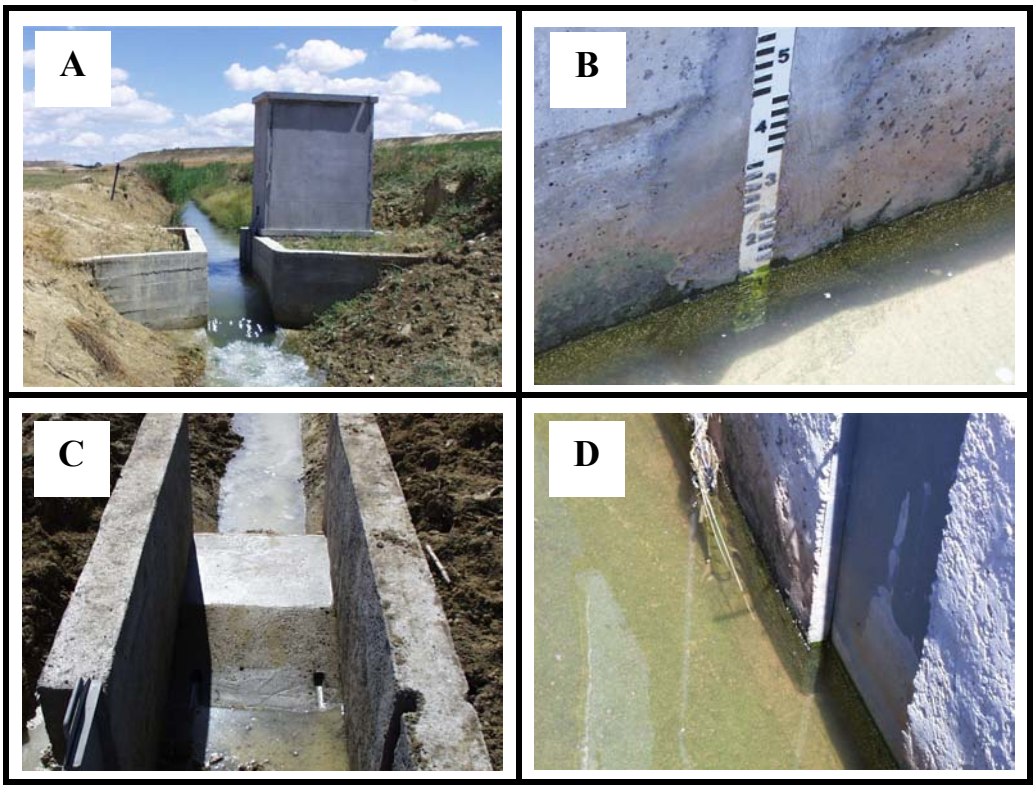


Figura 5.6. (A) Vista exterior de la estación de control en D-XXV-3; (B) Regla del aforador a partir de la cual se calibra el limnígrafo; (C) Sección cementada del desagüe y resalte construido en la base; (D) Tubería por la cual recoge agua el tomamuestras automático y tajadera que comunica el desagüe con el pozo donde se coloca la boya del limnígrafo.

Se tomaron datos de la altura de agua mediante limnígrafos de boya con registradores electrónicos situados sobre un pozo comunicado con el desagüe para amortiguar las oscilaciones. El espaciado entre la toma de datos de altura de agua estuvo condicionado por la variabilidad temporal del caudal y por la capacidad de almacenamiento de datos de los limnígrafos instalados. En D-XIX-6 se instaló un limnígrafo que tomó datos de altura cada 20 minutos. En D-XXV-3 y D-XXX-3 se instalaron limnígrafos con mayor capacidad de almacenamiento de datos que permitieron registrar las alturas cada 15 minutos.

La curva de gasto o relación entre altura y caudal fue calculada mediante el programa informático Winflume (Whal *et al.*, 2000). Este programa construye la tabla de valores caudal-altura de agua a partir de las características geométricas del aforador (Fig. 5.7). La ecuación obtenida por regresión para las dimensiones de los tres aforadores instalados es:

$Q = [0{,}969 + (0{,}907 \cdot h)] \cdot h^{0{,}645}$; $R^2 = 0{,}99$, donde Q es el caudal (L/s) y h la altura de agua (cm).

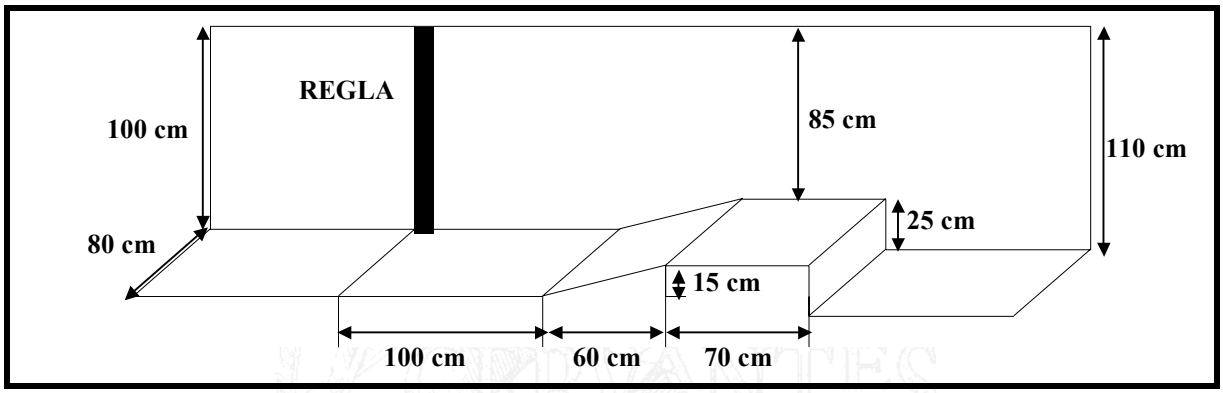


Figura 5.7. Croquis de los aforos construidos en las estaciones de control.

Las características hidrogeológicas de las cuencas C-XIX-6 y C-XXV-3 permiten asumir un drenaje subterráneo nulo, lo que implica que toda el agua es drenada por el desagüe. Sin embargo, la cuenca C-XXX-3 presenta un importante drenaje subterráneo. Para estudiar el comportamiento del acuífero de Miralbueno en la cuenca C-XXX-3 (flujos subterráneos, *CE* y $[NO_3^-]$) se realizó el seguimiento de 11 pozos situados en el interior y en su periferia (Fig. 5.8).

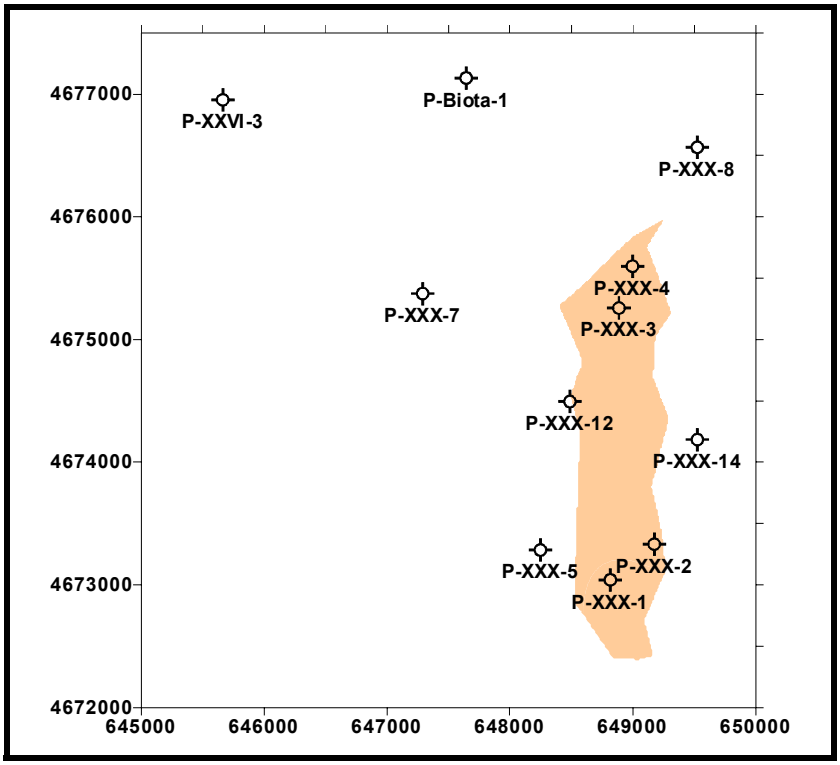


Figura 5.8. Situación de los 11 pozos utilizados para el seguimiento del acuífero de Miralbueno en la cuenca C-XXX-3.

Cada 21 días se tomaron medidas del nivel freático y se recogieron muestras de agua para el posterior análisis en el laboratorio (*CE* y [NO_3^-]). En P-XXX-1 (pozo situado en el borde Sur de la cuenca) se instaló un limnígrafo con el fin de obtener el registro continuo del espesor saturado del acuífero de Miralbueno en la zona de salida de la cuenca de estudio.

Con la media de los datos obtenidos en los 11 pozos, se ha realizado la cartografía piezométrica y los mapas de isolíneas de *CE* y [NO_3^-] de la cuenca C-XXX-3 para las estaciones de no riego (oct-00/mar-01) y de riego (abr-01/sept-01).

El drenaje subterráneo de la cuenca C-XXX-3 se produce a través de la sección transversal a la cuenca en su borde Sur. Este volumen de agua se ha estimado diariamente aplicando la ley de Darcy en la perpendicular al flujo que pasa por el pozo P-XXX-1:

$Q = K \cdot A \cdot i$, donde Q (m^3/día) es el caudal, K (m/día) es la permeabilidad, A (m^2) es la sección saturada, e i (m/m) es el gradiente hidráulico.

La permeabilidad (K) se obtuvo a partir de la granulometría de una muestra del glacis de Miralbueno (formación cuaternaria que constituye el acuífero). La superposición de la granulometría sobre las curvas de Breddin (Fig. 5.9) muestra que sigue mayoritariamente la clase 2 (K= 600 m/día).

Estas curvas están preparadas para ser aplicadas en el área alemana de Nordrhein-Westfalen pero pueden dar una estimación de la permeabilidad de cualquier material no consolidado. Dada la desviación de la curva granulométrica hacia las clases 3 y 4, y debido a que los materiales más finos suelen dominar la permeabilidad del acuífero, se ha seleccionado para el acuífero de Miralbueno una permeabilidad de 400 m/día.

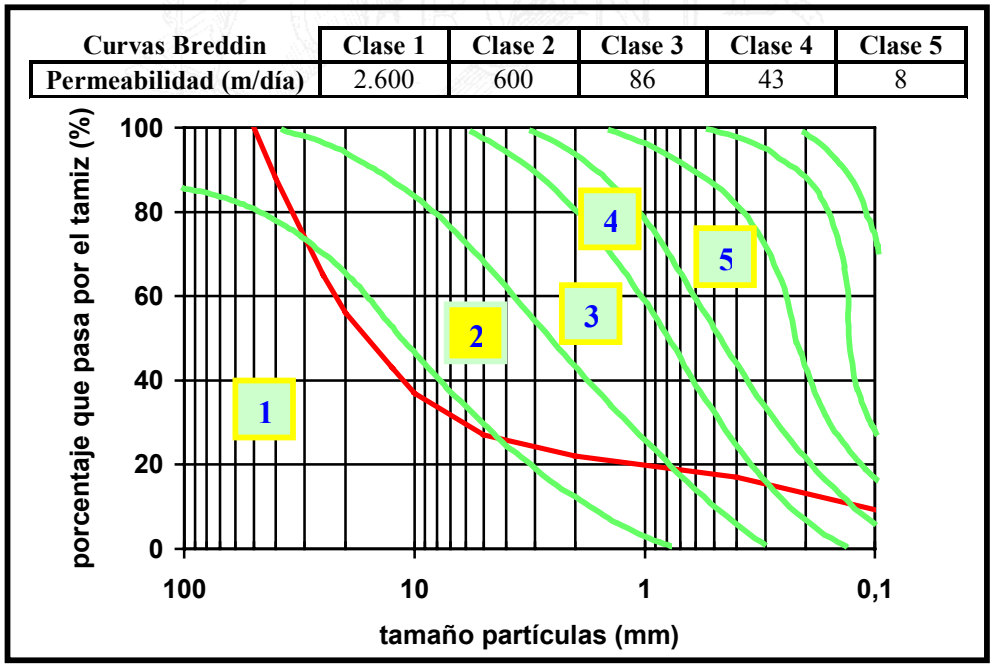


Figura 5.9. Estimación de la permeabilidad (*K*, m/día) mediante la superposición de la granulometría del glacis de Miralbueno sobre las curvas de Breddin (Custodio, 1983).

Dado que la potencia del glacis de Miralbueno en el borde Sur de la cuenca C-XXX-3 se corresponde con la profundidad del pozo P-XXX-1, la sección saturada (A) se calculó diariamente como el producto de los espesores saturados medidos en P-XXX-1 (Fig. 5.10) y la distancia perpendicular al flujo en el borde Sur de la cuenca (600 m).

El gradiente hidráulico (i) se determinó para las estaciones de riego y no riego a partir de la media de los niveles piezométricos medidos en los 11 pozos controlados. Para su cálculo se utilizó el programa informático SURFER (Golden Software, 1995).

La coincidencia en la profundidad del nivel freático del acuífero en los días 1 de octubre de 2000 y 30 de septiembre de 2001 (Fig. 5.10) y la hipótesis de que el contenido de agua de la zona no saturada del sistema acuífero no difiere sustancialmente entre estas dos fechas (ausencia de lluvias y régimen de riego similar los últimos días de los años hidrológicos 2000 y 2001) permiten asumir en el balance anual (oct-00/sept-01) que la variación de agua en el sistema acuífero entre el estado inicial (1 de octubre de 2000) y el final (30 de septiembre de 2001) es muy pequeña.

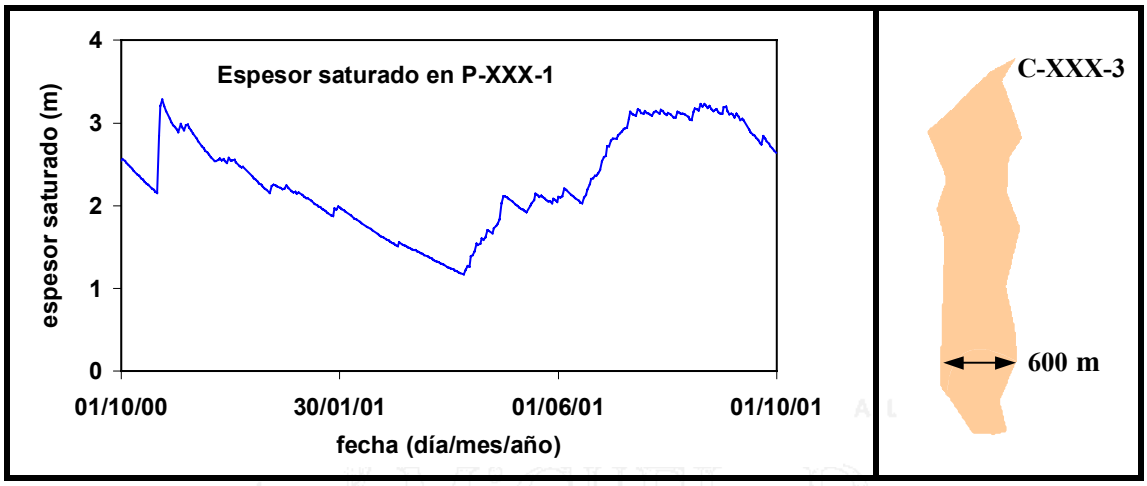


Figura 5.10. Evolución del espesor saturado (m) en P-XXX-1 y distancia perpendicular al flujo en el borde Sur de C-XXX-3 (salida del flujo subterráneo).

El flujo subterráneo entrante en cada una de las cuencas durante el año de estudio no pudo medirse y se estimó utilizando la ecuación del balance de agua en el sistema acuífero asumiendo que la variación de agua en el mismo fue nula ($VA = 0$).

$$FSE = (DSP + DSB) - D$$

5.2.2.3 Balance global en las cuencas

La asociación de los balances anuales de agua realizados en los dos subsistemas (suelo y acuífero) constituye el balance global de agua en las cuencas durante el año hidrológico oct-00/sept-01. La ecuación que define este balance es:

$$VC = [R + LL + FSE] - [ET_R + DSP + DSB]$$

donde la variación de agua en la cuenca (VC), constituida por la variación de agua en el suelo (VS) y la variación de agua en el sistema acuífero (VA), es igual a los flujos de entrada por riego (R), lluvia (LL) y subterráneos (FSE) menos los flujos de salida por evapotranspiración (ET_R), drenaje subterráneo (DSB) y drenaje superficial (DSP).

5.2.3 Balance de sales y nitrógeno

El balance anual (oct-00/sept-01) de sales y nitrógeno realizado asigna concentraciones a cada uno de los componentes del balance hídrico, excepto al volumen de agua evapotranspirado que se asume libre de sales. Así el balance de masa de sales queda definido por la ecuación:

$$SVC = [SR + SLL + SFSE] - [SDSB + SDSP]$$

donde las entradas al sistema son la masa de sales en el agua de riego (SR), en la lluvia (SLL) y en el flujo subterráneo entrante ($SFSE$), y las salidas del sistema son la masa de sales en el drenaje subterráneo ($SDSB$) y en el drenaje superficial ($SDSP$).

Dado que la variación en la masa de sales en el agua del sistema entre el estado inicial y final (irrelevante variación del volumen de agua y de su salinidad) es muy inferior al resto de los componentes del balance, la diferencia entre las entradas y salidas de sales en los flujos

hídricos (*SVC*) son atribuidas al resultado de los procesos de disolución-precipitación de sales en las cuencas.

La ecuación utilizada para definir el balance de masas de nitrógeno es:

$$O = [NR + NLL + NFSE + NF + NFS] - [NDSB + NDSP + NC]$$

donde *N* denota masa de nitrógeno. Además de los componentes asociados a los flujos de agua se ha incluido la fertilización nitrogenada de los cultivos (*NF*), el nitrógeno aportado al sistema por fijación simbiótica de las alfalfas (*NFS*) y las extracciones de *N* en las cosechas (*NC*).

Para los componentes asociados a los flujos de agua (*NR*, *NLL*, *NFSE*, *NDSB* y *NDSP*) se ha considerado únicamente el nitrógeno en forma de nitrato. La diferencia entre las entradas y las salidas de nitrógeno (*O*) se atribuyen a diversos factores que no se han tenido en cuenta en el balance: a) el nitrógeno en formas minerales distintas al nitrato (nitrito (NO_2^-), amonio (NH_4^+)) o en forma orgánica, b) las perdidas a la atmósfera por volatilización y desnitrificación y c) la variación de nitrógeno en las cuencas (suelo y acuífero).

Además, las masas de sales y nitrógeno en el drenaje propio de la cuenca (*SD* y *ND*) se han estimado por diferencia entre la masa de sales y nitrógeno del drenaje global (superficial y subterráneo) y del flujo subterráneo entrante.

$$SD = [(SDSB + SDSP) - SFSE];\ ND = [(NDSB + NDSP) - NFSE]$$

Esta aproximación sobreestima los valores reales de *SD* y *ND* ya que incluye las masas de sales y nitrógeno disueltos por los flujos subterráneos entrantes. Esta sobreestimación puede ser significativa para las sales por la mayor presencia de éstas en el sustrato terciario, pero de pequeña importancia para el nitrógeno ya que, excepto el acumulado en la zona no saturada y que pudiera ser disuelto por ascensos del nivel freático, es movilizado por los flujos verticales.

La concentración de sales y nitrógeno del drenaje propio de la cuenca se ha calculado como el cociente entre las masas respectivas y el volumen de drenaje:

$$TDS = \frac{SD}{D};\quad [N] = \frac{ND}{D}$$

La metodología utilizada para la medida o estimación de los componentes considerados en los balances de sales y nitrógeno se describe a continuación.

5.2.3.1 Sales y nitrógeno en el riego y la lluvia

Se midió la concentración de sales y nitrato en 12 muestras de agua de lluvia (estación meteorológica CR10-Ejea) y 12 de agua de riego (Canal de Bardenas).

La concentración en sales se estimó midiendo la *CE* a 25 ºC con un conductímetro y transformándola a sólidos disueltos totales (*SDT*) mediante la ecuación *SDT* (mg/L)= 640 · *CE* (dS/m) (U.S.S.L., 1954). La [NO_3^-] se determinó por cromatografía iónica.

Dada la baja variabilidad en la concentración de sales y nitrato en estas aguas, inferior al error en los métodos de medida utilizados, la masa de sales y nitrato aportadas por riego y lluvia se ha calculado como el producto de la concentración media de las muestras analizadas (Tabla 5.3) por el volumen total aportado.

Tabla 5.3. Valores medios de sólidos disueltos totales (*SDT*) y concentración de nitratos ([NO_3^-]) en el agua de riego (Canal de Bardenas) y lluvia (estación meteorológica CR10-Ejea) durante el año hidrológico 2001.

	***SDT* (mg/L)**	**[NO_3^-] (mg/L)**
Agua de riego	190	1,22
Agua de lluvia	48	0,55

5.2.3.2 Sales y nitrógeno en los flujos subterráneos

La Tabla 5.4 presenta la *CE* y [NO_3^-] estimadas para los flujos subterráneos entrantes a cada cuenca. La concentración de sales y nitrato del flujo subterráneo entrante en C-XXX-3 se ha estimado a partir de los mapas de isolíneas de *CE* y [NO_3^-] del acuífero de Miralbueno obtenidos del seguimiento de los 11 pozos bajo esta cuenca. Para el flujo entrante en C-XXV-3 se ha tomado el mismo valor que en C-XXX-3 debido a que el borde Norte de ambas cuencas se sitúa en una misma isolínea de *CE* y [NO_3^-] del acuífero de Miralbueno (Capítulo 4).

La *CE* y [NO_3^-] correspondiente al flujo subterráneo entrante en C-XIX-6 se ha estimado a partir de los valores medios de dos muestras tomadas en P-XVIII-3 (pozo del acuífero de Miraflores más cercano a C-XIX-6) en estación de riego y no riego (Capítulo 4).

Tabla 5.4. *CE* y [NO_3^-] media anual estimada de los flujos subterráneos entrantes.

	C-XIX-6	C-XXV-3	C-XXX-3
***CE* (dS/m)**	1,00	0,56	0,56
[NO_3^-] (mg/L)	175	60	60

La *CE* se convirtió a concentración de sales utilizando las ecuaciones de regresión obtenidas para el agua de cada desagüe (Apdo. 5.2.3.5). La masa anual de sales y nitrógeno en el flujo subterráneo entrante se ha calculado como el producto del volumen anual del flujo subterráneo entrante por la concentración media anual estimada de sales y nitrato.

5.2.3.3 Aporte de nitrógeno por fertilización

El aporte de nitrógeno por fertilización orgánica e inorgánica se obtuvo a partir de encuestas telefónicas realizadas a los agricultores. Las dosis de abonado se obtuvieron individualmente para cada *UPRC* y se convirtieron a masa de nitrógeno corrigiendo por el contenido de nitrógeno del fertilizante empleado (Tabla 5.5). Una vez obtenido el aporte de nitrógeno por fertilización para cada *UPRC,* el aporte total a cada cuenca se obtuvo mediante la suma de las *UPRC* que la componen.

Tabla 5.5. Clases de abonos utilizados y su contenido en nitrógeno (%).

Clase	Contenido Nitrógeno	Clase	Contenido Nitrógeno
Purín porcino [(1)]	0,55 %	**15-15-15**	15 %
Estiércol ovino [(1)]	0,67 %	**16-16-16**	16 %
0-20-20	0 %	**17-17-17**	17 %
8-15-15	8 %	**19-19-19**	19 %
8-20-20	8 %	**20-10-10**	20 %
8-24-16	8 %	**N-32 Líquido**	32 %
10-20-20	10 %	**Nitrato amónico**	33,5 %
13-0-45	13 %	**Urea**	46 %

[(1)] Fuente: Orús *et al.*, 2000.

5.2.3.4 Aporte de nitrógeno por fijación simbiótica

Entre los cultivos de las cuencas estudiadas, únicamente la alfalfa fija simbióticamente nitrógeno atmosférico. Los datos sobre fijación simbiótica de la alfalfa son muy variables (Orús *et al.*, 2000) por lo que se optó por considerar que fija la misma cantidad que extrae en la producción (27,5 kg N/t producción), esto es, se asume que este cultivo fija la cantidad de nitrógeno que necesita para su óptimo desarrollo.

5.2.3.5 Sales y nitrógeno en el drenaje superficial

Cada una de las estaciones de control ubicadas en los desagües fue equipada con un tomamuestras automático ISCO capaz de recoger y almacenar hasta 24 muestras de agua de 200 ml (Fig. 5.11). Los tomamuestras fueron programados para tomar una muestra diaria a las 15:00 horas solares. Las muestras almacenadas se recogieron con una frecuencia aproximada de 21 días y se trasladaron al laboratorio para medir la conductividad eléctrica a 25 ºC (*CE*) con un conductímetro ORION, y la concentración de nitrato ($[NO_3^-]$) con un cromatógrafo iónico Dionex 2.000-ISP con supresión química.

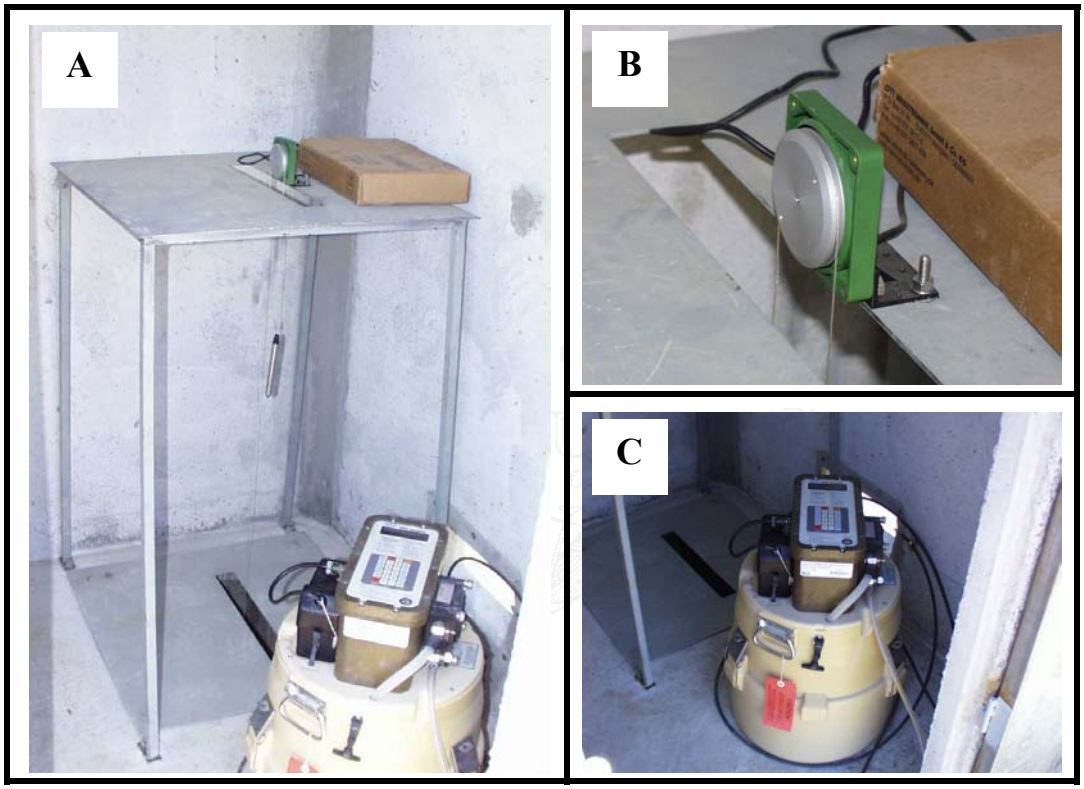


Figura 5.11. (A) Vista del interior de la estación de control. (B) Detalle del limnígrafo Thalímedes (C) Tomamuestras automático ISCO.

Los sólidos disueltos totales (*SDT*) se midieron en 45 muestras filtradas de agua por pesada constante del residuo seco obtenido por evaporación a 105 ºC. La Figura 5.12 presenta las ecuaciones de regresión lineal *CE-SDT* obtenidas para cada desagüe. Estas ecuaciones se utilizaron para convertir la *CE* a *SDT*.

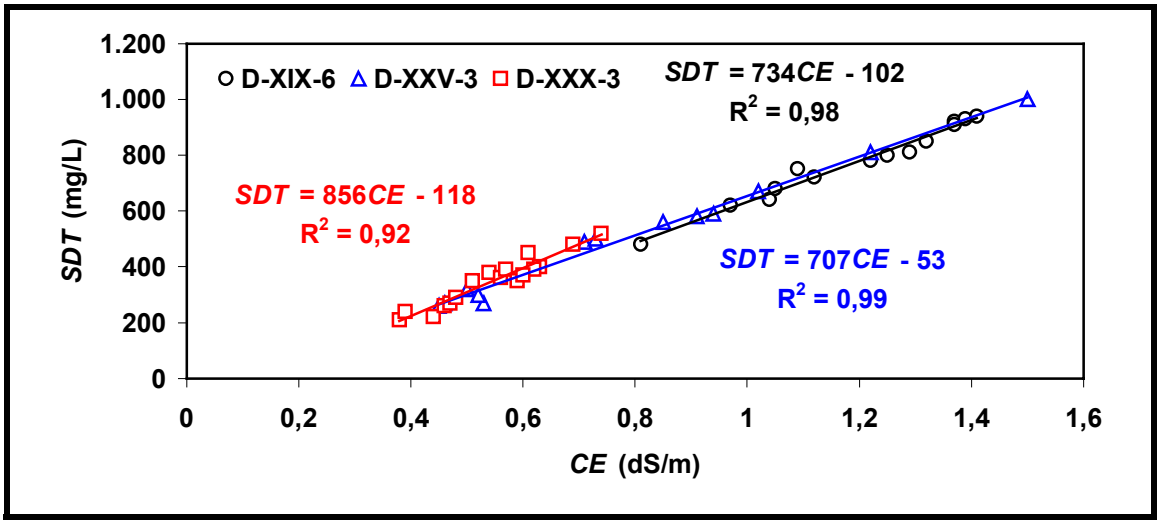


Figura 5.12. Regresión lineal (*CE-SDT*) obtenida en las aguas de los desagües D-XIX-6, D-XXV-3 y D-XXX-3.

Las masas de sal y nitrato exportadas diariamente de las cuencas a través de los desagües que las drenan se calcularon como el producto del caudal medio diario por la concentración de sal (*CE* transformada a *SDT*) o de nitrato ($[NO_3^-]$) de la muestra tomada en ese día.

5.2.3.6 Sales y nitrógeno en el drenaje subterráneo

La *CE* y $[NO_3^-]$ del drenaje subterráneo en C-XXX-3 (Tabla 5.6) se han estimado a partir del seguimiento del acuífero correspondiente, tomando dos valores correspondientes a la media de las estaciones de no riego (oct-00/mar-01) y riego (abr-01/sept-01).

Tabla 5.6. *CE* y $[NO_3^-]$ del drenaje subterráneo en C-XXX-3.

	(oct-00/mar-01)	(abr-01/sept-01)
***CE* (dS/m)**	0,82	0,52
$[NO_3^-]$ (mg/L)	110	40

La *CE* se convirtió a sólidos disueltos totales (*SDT*) utilizando la ecuación de regresión obtenida en el agua del desagüe D-XXX-3 (Fig. 5.12). La masa de sales y nitrógeno en el drenaje subterráneo se ha obtenido mediante el producto del volumen de drenaje subterráneo de las estaciones de riego y no riego por las respectivas concentraciones de sales y nitrato.

5.2.3.7 Extracción de nitrógeno por las cosechas

La masa anual de nitrógeno extraída por las cosechas ha sido calculada para cada cultivo a partir de los rendimientos productivos obtenidos en cada *UPRC* mediante las encuestas a los agricultores y las extracciones unitarias indicadas por Domínguez, (1997) (Tabla 5.7).

Tabla 5.7. Extracción de nitrógeno por las cosechas en función del rendimiento productivo (Domínguez, 1997).

CULTIVO	Kg N/t de producción	CULTIVO	Kg N/t de producción
Maíz	16	**Trigo**	20
Alfalfa	27,5	**Pimiento**	4,6
Girasol	30	**Arroz**	14

En aquellas *UPRC* cuya producción ha sido consumida directamente por el ganado ovino se ha considerado que no existe exportación de nitrógeno al exterior de la cuenca. Los desechos de cosecha (rastrojos) son enterrados por lo que no contribuyen al nitrógeno exportado.

5.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.3.1 Caracterización de las cuencas piloto

La cuenca de mayor extensión es C-XXX-3 con una superficie de 217 ha. Esta cuenca se incluye dentro del glacis de Miralbueno y, por tanto, presenta en su totalidad suelos de saso que son regados por inundación. Su topografía desciende uniformemente hacia el Sur según un gradiente del 1,2%. El tamaño medio de sus tablares es de 3,31 ha y gran parte de ellos se encuentran sin nivelar.

La cuenca C-XXV-3, con una superficie de 146 ha, corresponde a un valle que se desarrolla desde el glacis de Miralbueno hacia el aluvial del río Riguel. Los suelos de saso (40% de la superficie) se sitúan en las áreas topográficamente más altas. Sobre el terciario lutítico de las laderas y el fondo del valle, se desarrolla el resto de los suelos de esta cuenca (60% de la superficie). El riego se realiza tanto por inundación (61% de la superficie regada) como por aspersión (39% de la superficie regada). La Figura 5.13 presenta la cartografía de suelos y de sistemas de riego en C-XXV-3. La superficie media de los tablares de riego es de 1,06 ha, aunque los tablares regados por aspersión tienen una superficie mucho mayor (Fig. 5.13).

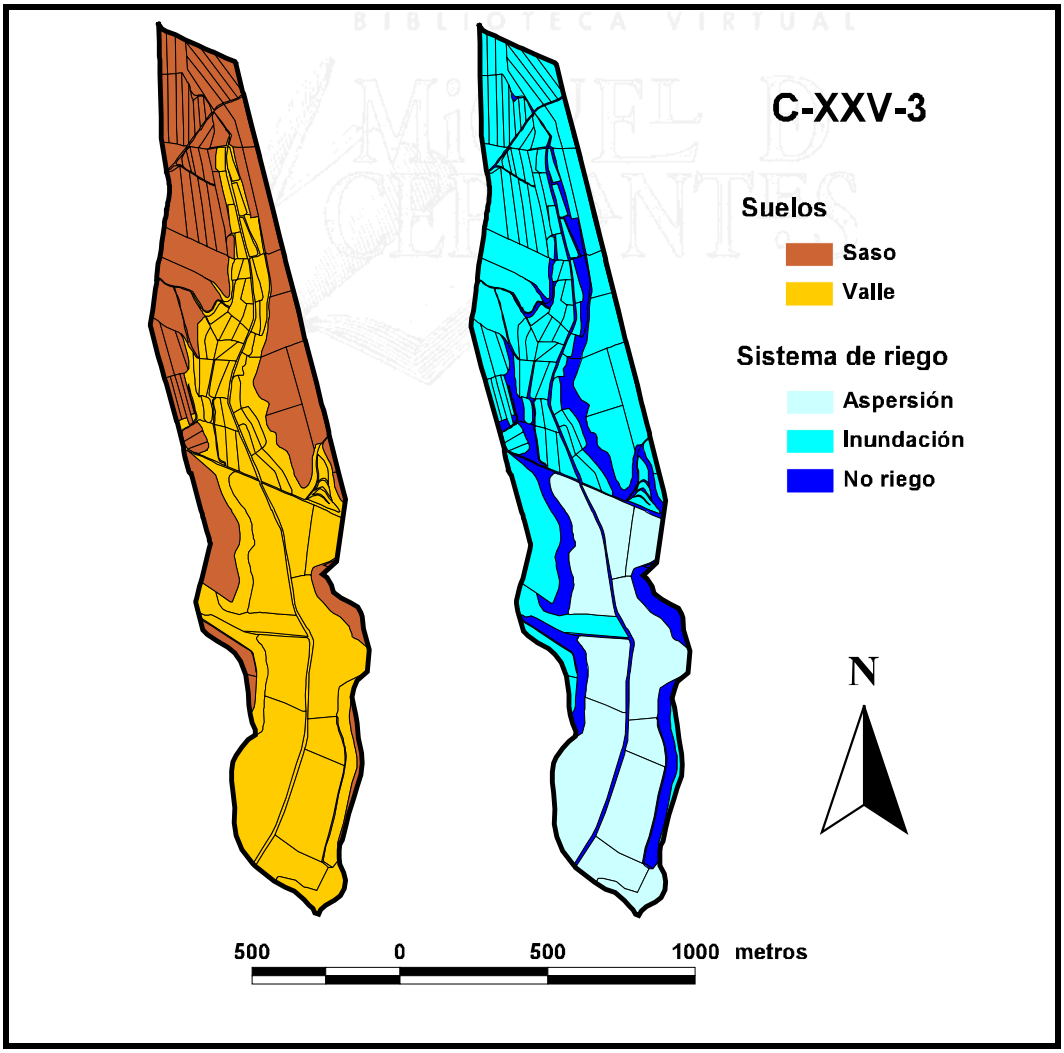


Figura 5.13. Cartografía de suelos (saso y valle) y sistemas de riego (inundación y aspersión) de C-XXV-3.

La cuenca de menor extensión es C-XIX-6 con una superficie de 94 ha. El 67% de los suelos son de saso y el resto de valle. Esta cuenca se sitúa sobre un pequeño valle desarrollado desde el glacis de Miraflores hacia el aluvial del río Riguel. El tamaño medio de sus tablares es inferior a 1 ha, siendo todos ellos regados por inundación.

5.3.1.1 Cultivos

La superficie de C-XIX-6 durante el período de estudio (oct-00/sept-01) se distribuyó principalmente entre los cultivos del maíz (47%), localizado en la mitad Norte de la cuenca, y de alfalfa (46%) situado en la mitad Sur (Fig. 5.14).

Debido a los distintos tipos de suelo (saso y valle) y al desarrollo de actividad ganadera, la distribución de cultivos en C-XXV-3 fue más variada. El maíz y la alfalfa fueron los cultivos mayoritarios, con el 32% y el 16% de la superficie respectivamente. Los cultivos herbáceos para uso ganadero ovino, inexistentes en las otras cuencas, ocuparon un 13% de la superficie. Otros cultivos minoritarios fueron el girasol (6%), el cereal de invierno (4%), el chopo (2%), el pimiento (1%) y el arroz (1%). Las laderas de mayor pendiente y las parcelas en barbecho, contribuyeron a que esta cuenca presentase un porcentaje de superficie no cultivada (26%) muy superior al de C-XIX-6 (5%) y C-XXX-3 (2%).

C-XXX-3 presentó como cultivos mayoritarios el maíz (55%) y la alfalfa (26%) seguido del cereal de invierno (8%). Destacó en la cuenca C-XXX-3 que el 8% de su superficie estuviese ocupada por cultivos hortícolas (4% de pimiento, 2% de puerro y 2% de cebolla) frente al 1% de las otras dos cuencas.

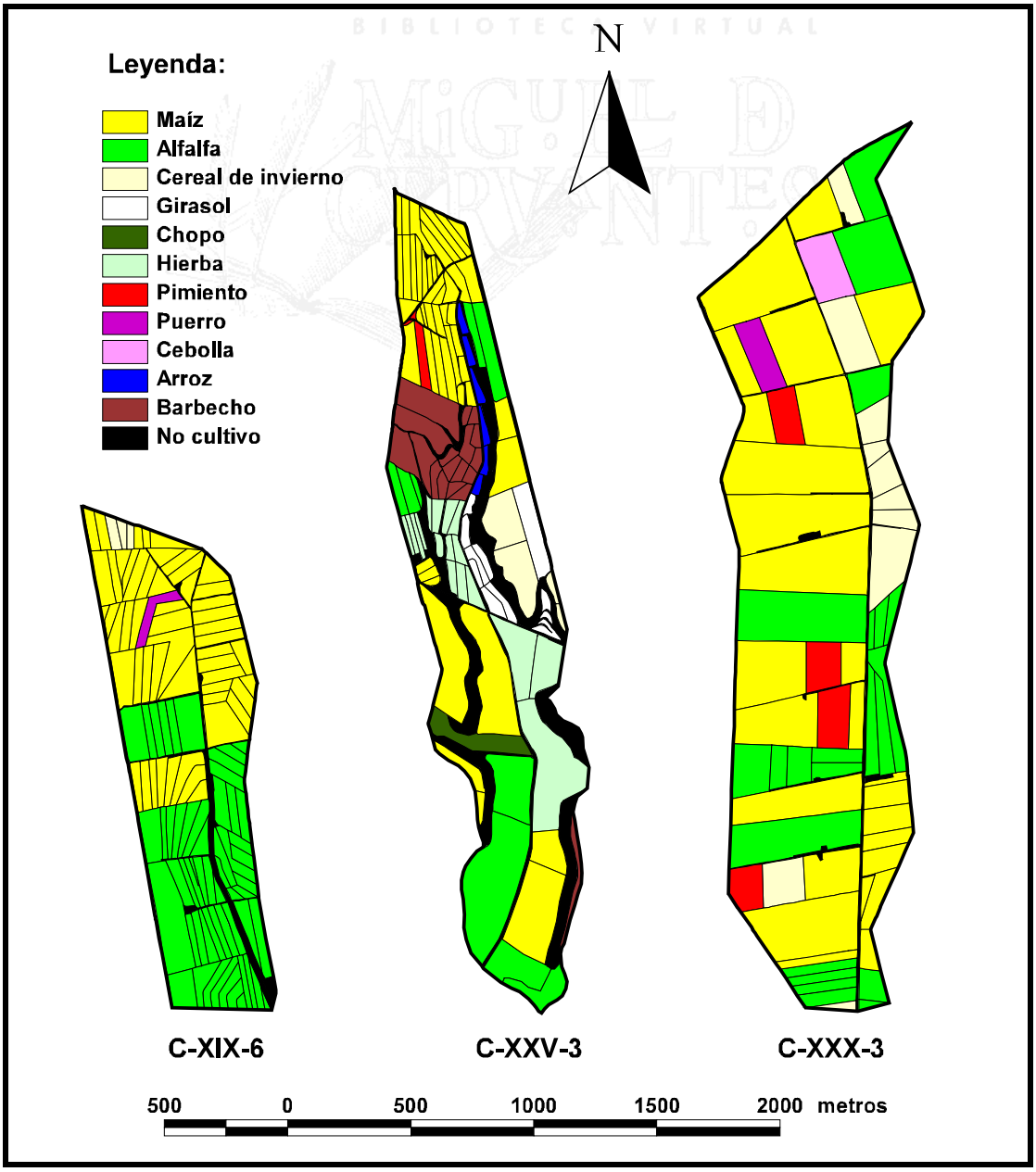


Figura 5.14. Mapa de cultivos de las cuencas piloto en la campaña de 2001.

5.3.1.2 Riego

Las diferentes características físicas y agronómicas de las cuencas estudiadas se reflejan en los consumos de agua de riego. C-XIX-6 presentó un consumo medio durante el año de estudio de 1.150 mm, intermedio entre los 950 mm de C-XXV-3 y los 1.400 mm de C-XXX-3.

Las dosis medias aplicadas en el riego por inundación de C-XXX-3 (174 mm/riego) son sensiblemente superiores a las dosis medias aplicadas en C-XIX-6 (135 mm/riego). Aunque los caudales son mayores en C-XXX-3 (187 L/s de media) que en C-XIX-6 (129 L/s), el tiempo invertido en cada riego es similar en ambas cuencas (2,9 horas/ha).

Este hecho se debe a la mayor extensión y falta de nivelación de las parcelas de C-XXX-3 y posiblemente a una menor capacidad de infiltración de los suelos de C-XIX-6 (limitados inferiormente por lutitas impermeables) frente a los de C-XXX-3 (con un gran espesor de gravas muy permeables bajo sus suelos). En la cuenca C-XXV-3 las parcelas regadas por inundación reciben dosis medias por riego de 140 mm mientras que las parcelas en aspersión son regadas aplicando dosis menores (72 mm/riego) lo que disminuye la media de la cuenca a 113 mm/riego.

5.3.1.3 Fertilización nitrogenada

Las dosis de fertilización varían según el manejo realizado por el agricultor dependiendo del cultivo y de las características particulares de la parcela (sistema de riego y suelo). La dosis de fertilización nitrogenada media aplicada en C-XXX-3 durante el año de estudio fue de 357 Kg N/ha, que supera ampliamente a las dosis medias de C-XIX-6 con 233 Kg N/ha y de C-XXV-3 con 203 Kg N/ha (Fig. 5.15).

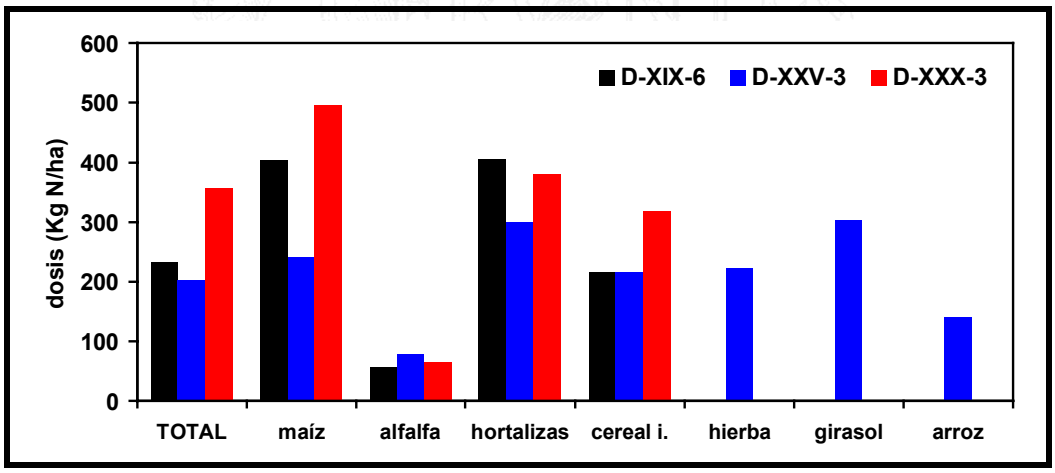


Figura 5.15. Dosis medias de fertilización nitrogenada (Kg N/ha) para el maíz, alfalfa, hortalizas, cereal de invierno, hierba, girasol, arroz y para el conjunto de las cuencas (TOTAL) C-XIX-6, C-XXV-3 y C-XXX-3 durante el año hidrológico 2001.

El maíz junto con las hortalizas recibió las mayores dosis de nitrógeno, mientras que las dosis más bajas (inferiores a 80 Kg N/ha) se aplicaron a la alfalfa, ya que este cultivo en pleno desarrollo se autoabastece del nitrógeno que es capaz de fijar de la atmósfera.

El agricultor incrementa las dosis en los suelos más permeables intentando compensar las pérdidas de nitrógeno por lavado. Así, en C-XXV-3 (cuenca con menor porcentaje de suelos de saso y manejo del fertirriego) las dosis medias aplicadas al maíz fueron de 262 Kg N/ha, en C-XIX-6 la media ascendió a 402 kg N/ha y en la cuenca que únicamente posee suelos de saso las dosis medias aplicadas al maíz alcanzaron los 495 Kg N/ha (Fig. 5.15).

La extensión ocupada por el maíz unida a las elevadas dosis de nitrógeno que recibe provoca que sea el cultivo con mayores aportaciones de nitrógeno por fertilización en las tres cuencas. Así, la aportación de nitrógeno al maíz supuso el 85% del N aportado en C-XIX-6, el 52% en C-XXV-3, y el 78% en C-XXX-3 (Fig. 5.16).

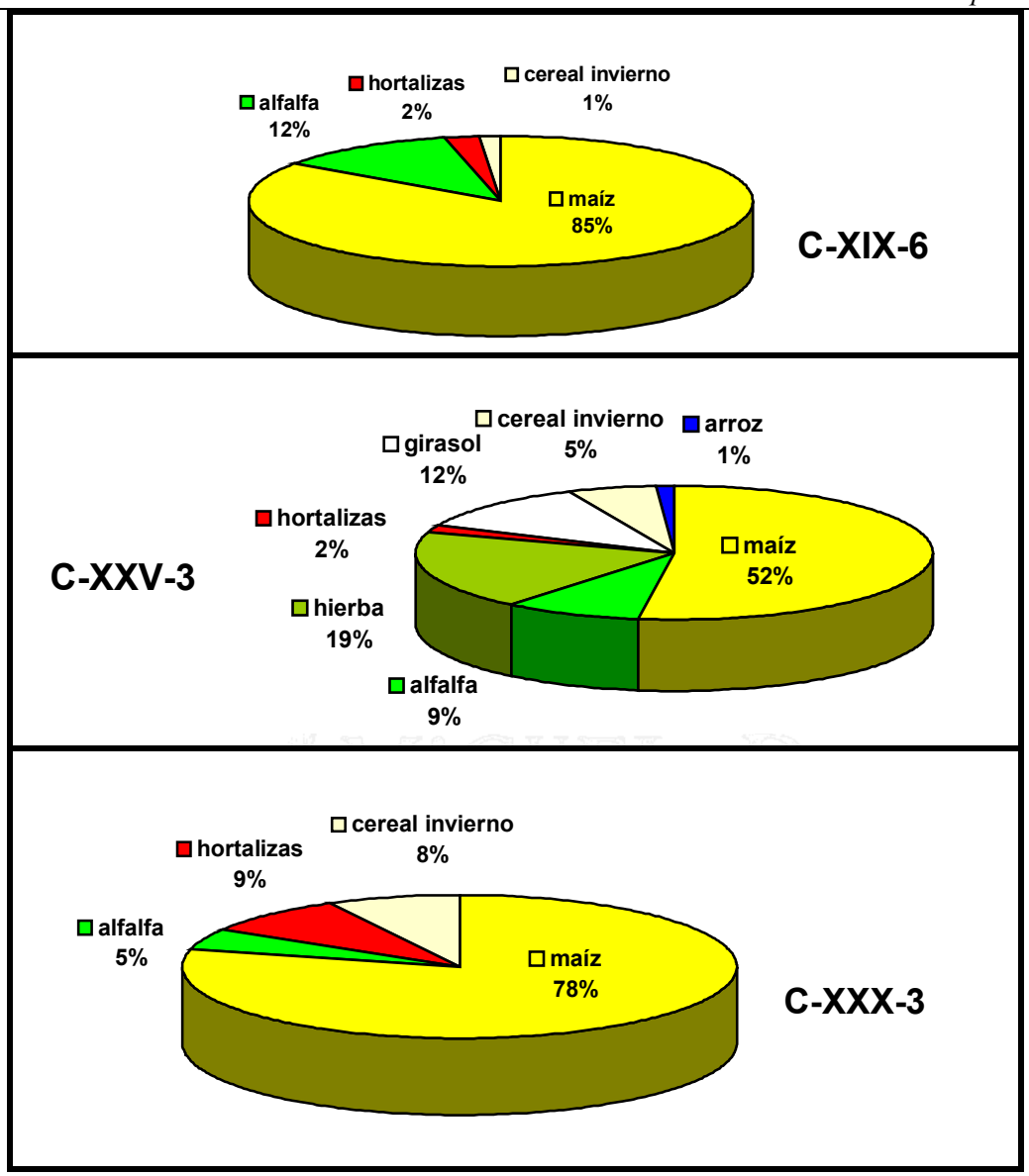


Figura 5.16. Distribución del nitrógeno (% del total) aportado por fertilización a los distintos cultivos en C-XIX-6, C-XXV-3 y C-XXX-3 durante el año hidrológico 2001.

La aplicación de nitrógeno a las cuencas está localizada en la primavera. Junio es con diferencia el mes de mayor aporte y en el que se presentan las mayores diferencias entre cuencas (Fig. 5.17).

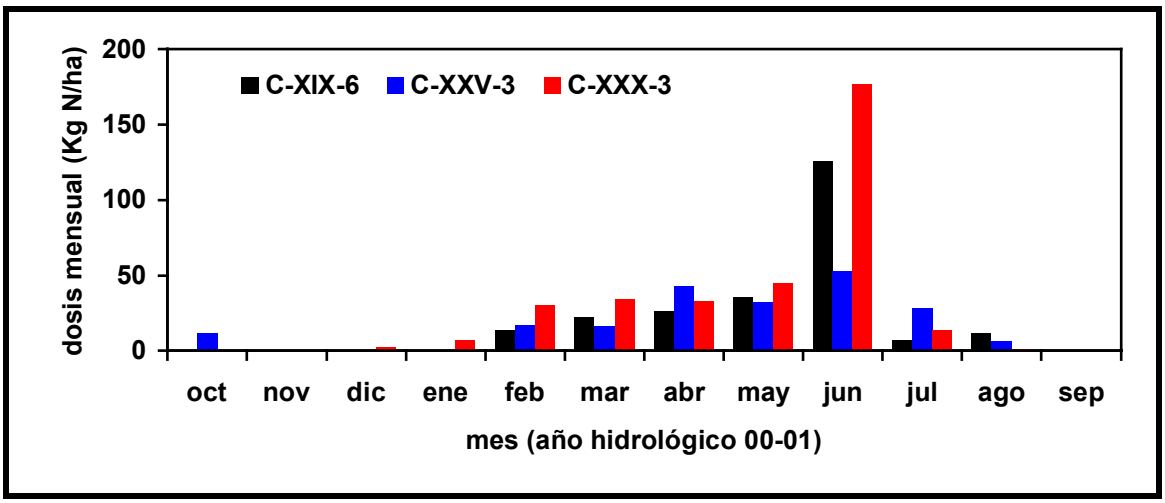


Figura 5.17. Dosis mensual de nitrógeno aportado a las cuencas por fertilización (Kg N/ha) durante el año hidrológico 2001.

Durante este mes se realiza la primera y habitualmente única fertilización de cobertera del maíz. C-XXX-3 es la cuenca que posee la mayor superficie de maíz (55%) y se aplican las mayores dosis en el abonado de cobertera de junio (326 Kg N/ha en forma de urea al 46%) por lo que presenta el mayor aporte de nitrógeno por fertilización (177 kg N/ha en junio). Le sigue C-XIX-6 (126 Kg N/ha en junio) cuya superficie de maíz (47%) y dosis aplicadas en el abonado de cobertera al maíz (275 Kg N/ha en forma de urea al 46%) son menores.

En las parcelas de maíz regadas por aspersión se fraccionó la dosis de nitrógeno aplicándose por fertirrigación. Por ello, la dosis media aplicada al maíz en junio sobre C-XXV-3 descendió hasta 147 kg N/ha (urea al 46% y N-32% líquido). Esta circunstancia unida a la menor superficie de maíz (32%) provoca que las dosis de nitrógeno aplicadas en junio sobre C-XXV-3 fuesen sensiblemente inferiores (53 Kg N/ha).

5.3.2 Drenaje superficial de las cuencas

5.3.2.1 Régimen hidrológico de los desagües

La Tabla 5.8 presenta los estadísticos de los caudales instantáneos registrados en las estaciones de control de los tres desagües (cada 15 minutos en D-XXV-3 y D-XXX-3 y cada 20 minutos en D-XIX-6) durante todo el año hidrológico 2001 y en sus estaciones de no riego (oct-00/mar-01) y riego (abr-01/sep-01).

El desagüe con los caudales medios más elevados durante el año hidrológico 2001 fue D-XXV-3 (Q_{medio}= 68 L/s), seguido por D-XXX-3 (Q_{medio}= 54 L/s) y D-XIX-6 (Q_{medio}= 34 L/s).

Tabla 5.8. Media (*m*), coeficiente de variación (*CV*), máximo y mínimo de los caudales instantáneos registrados en los tres desagües estudiados durante todo el año hidrológico 2001. Media (*m*) y coeficiente de variación (*CV*) de los caudales instantáneos registrados en las estaciones de no riego (oct-00/mar-01) y riego (abr-01/sep-01).

Desagüe	año hidrológico oct-00/sept-01				no riego		riego	
	m (L/s)	*CV* (%)	*máx* (L/s, fecha y hora)	*mín* (L/s, fecha)	*m* (L/s)	*CV* (%)	*m* (L/s)	*CV* (%)
D-XIX-6	34	102	531 (01/07/01, 18:20,18:40,19:00)	4 (15/04/01)	17	54	51	81
D-XXV-3	68	63	644 (21/10/00, 13:45)	10 (06/10/00)	51	56	86	56
D-XXX-3	54	125	1.229 (21/10/00, 14:15)	0 (5-25/03/01)	21	226	87	78

Los caudales medios de D-XXX-3 son menores a los esperados teniendo en cuenta la superficie de la cuenca drenante (217 ha) y las elevadas dosis de agua de riego aplicadas (media de 1.400 mm). Ya se discutió anteriormente que el desagüe D-XXX-3 no es capaz de drenar la totalidad del flujo subsuperficial puesto que parte de él se infiltra hasta el acuífero de Miralbueno y circula a cotas inferiores al desagüe.

La variabilidad que presentan los tres desagües es alta (Tabla 5.8). La mayor se registra en D-XXX-3 (*CV*= 125%) como consecuencia de unas mayores variaciones de caudal a lo largo del año y durante un mismo día de riego (Fig. 5.18B). El desagüe D-XXV-3 presenta la menor variabilidad (*CV*= 63%) porque: a) las parcelas regadas por inundación se disponen en tablares que drenan superficialmente unos sobre otros disminuyendo los picos por escorrentía superficial del desagüe, b) el riego por aspersión de los suelos de valle no suele sobrepasar la capacidad de campo disminuyendo los picos de caudal producidos por drenaje subterráneo y c) el desagüe drena un flujo constante procedente de las filtraciones del Canal de Bardenas.

Los caudales máximos que se presentaron en D-XXX-3 (1.229 L/s) y D-XXV-3 (644 L/s) sólo están separados por media hora. Estos máximos corresponden al drenaje de las intensas lluvias del 21 de octubre de 2000. Suponiendo que las precipitaciones en ambas cuencas estuvieron sincronizadas, el adelanto en el tiempo del caudal máximo de D-XXV-3 frente al de D-XXX-3 muestra la menor regulación de la cuenca C-XXV-3 que posee mayores pendientes y suelos de menor capacidad de infiltración.

El máximo caudal en D-XIX-6 (531 L/s) se mantuvo constante durante una hora el 1 de julio de 2001. Este caudal correspondió al aporte de aguas de cola de la acequia A-XIX-3-1 sobre el elevado caudal circulante en la época de riego.

Los mínimos caudales registrados en D-XIX-6 y D-XXV-3 fueron de 4 y 10 L/s. Tras un largo período sin riego ni lluvias importantes, el 5 de marzo de 2001, D-XXX-3 llegó a secarse.

Los tres desagües siguen una misma pauta general a lo largo del año hidrológico. Durante la época de no riego (de octubre a abril) se registran caudales bajos y relativamente constantes que aumentan puntualmente por efecto de lluvias (Fig. 5.18A). En la época de riego (de abril a septiembre) los caudales aumentan y los limnigramas presentan picos correspondientes al drenaje del riego (Fig. 5.18B). Ocasionalmente se presentan oscilaciones del caudal debidas al vertido directo de las colas de acequia sobre los desagües que reflejan rápidos ascensos, estabilización mientras dura el vertido y rápidos descensos hasta alcanzar el caudal inicial (Fig. 5.18C).

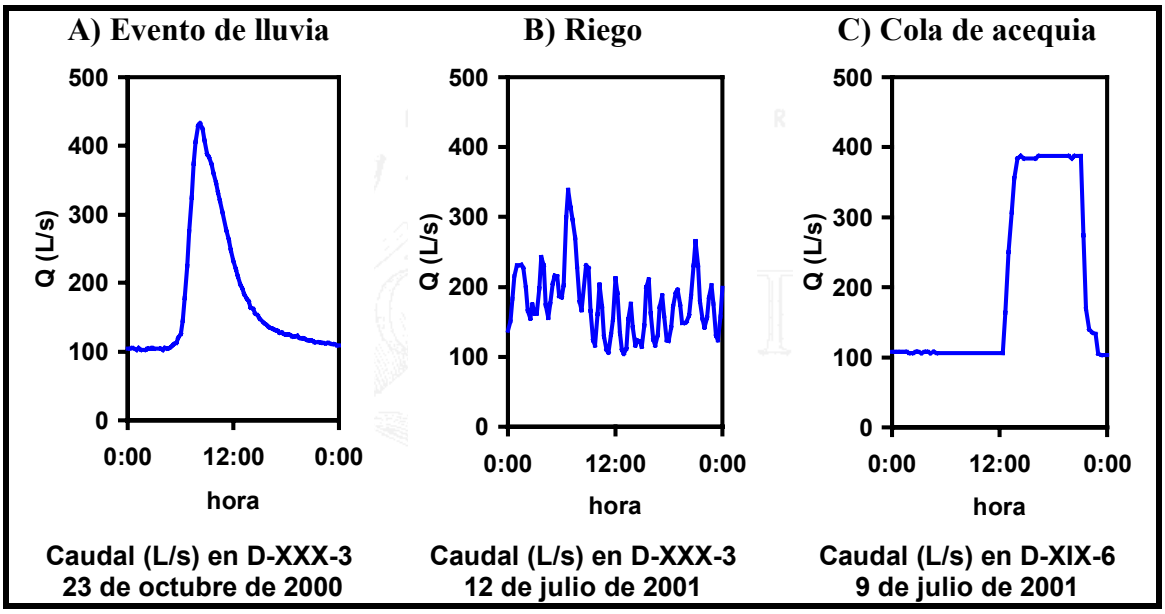


Figura 5.18. Variaciones del caudal producidas por: a) evento de lluvia en época de no riego (D-XXX-3 el 23 de octubre de 2001); b) drenaje de las parcelas en un día de riego (D-XXX-3 el 12 de julio de 2001) y c) cola de acequia (D-XIX-6 el 9 de julio de 2001).

Cada uno de los limnigramas presenta características particulares de su cuenca (Fig. 5.19). El aumento de caudal producido por las precipitaciones es reflejo de la superficie que drena cada desagüe. Así, el caudal medio diario del 21 de octubre en D-XXX-3 (392 L/s) es muy superior al de D-XXV-3 (236 L/s) y D-XIX-6 (69 L/s) en ese mismo día.

Los picos de caudal producidos por las lluvias de invierno y primavera son mucho más pronunciados en el limnigrama de D-XXV-3. Este hecho obedece a las mayores pendientes y menor permeabilidad de sus suelos (60% suelos de valle) lo que disminuye la infiltración y regulación de las aguas de lluvia. Este desagüe presenta un caudal base superior a los otros desagües debido al aporte procedente de las filtraciones del Canal de las Bardenas, que son recogidas íntegramente por el desagüe.

Los aumentos de caudal entre abril y septiembre responden principalmente a los riegos (Fig. 5.19). El limnigrama de D-XIX-6 refleja como los picos de caudal se distribuyen regularmente coincidiendo con los turnos de riego (intervalos aproximados de trece días).

Durante los días de riego, D-XXX-3 presentó grandes variaciones de caudal debido a que éste se compone en gran medida de escorrentías superficiales del riego poco reguladas. Las variaciones de caudal en los días de riego no son tan acusadas en las otras cuencas debido a que sus parcelas son menos extensas y están dispuestas en bancales que drenan unos sobre otros.

La distribución de cultivos se refleja en el riego y, por tanto, en los hidrogramas. D-XXX-3 presenta claramente un primer ascenso de caudal en abril como consecuencia de los riegos de la alfalfa y un segundo ascenso a mitad de junio por la incorporación al riego de las parcelas de maíz.

La relación entre caudal durante la estación de riego y caudal en la estación de no riego está asociada con las dosis de riego aplicadas en la cuenca hidrológica de cada desagüe. Así, D-XXX-3 presentó la mayor relación (4,1) seguido de D-XIX-6 (3,0) y por último de D-XXV-3 (1,7). Además la menor relación obtenida en D-XXV-3 está inducida por el drenaje completo de filtraciones del Canal de Bardenas, constantes durante todo el año hidrológico, hecho que no se produce en D-XIX-6 (no recibe filtraciones del Canal) ni en D-XXX-3 (recibe filtraciones del Canal pero no es capaz de drenarlas íntegramente).

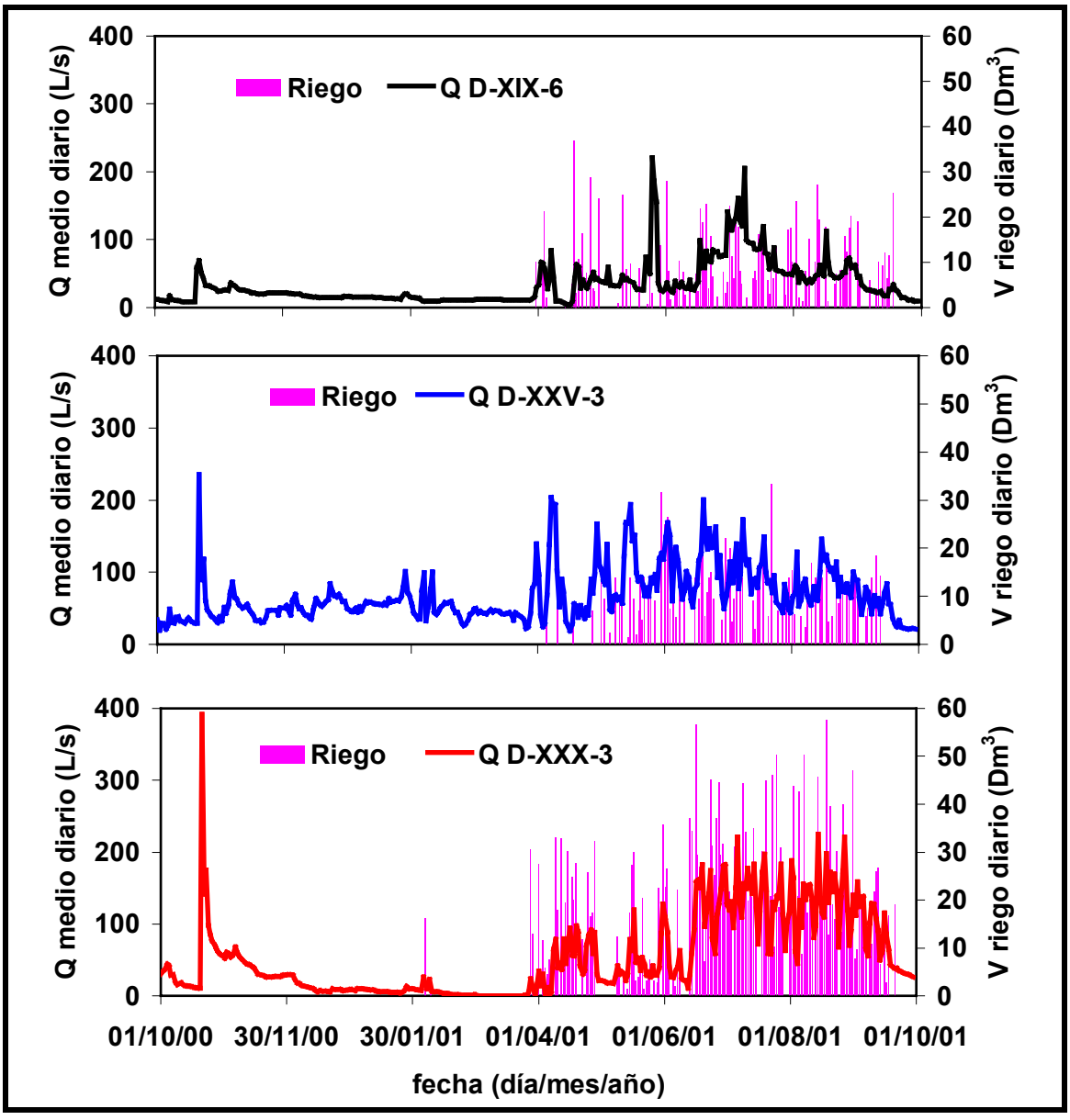


Figura 5.19. Caudales medios diarios (Q) y volúmenes diarios de riego (V) en los desagües D-XIX-6, D-XXV-3 y D-XXX-3 durante el año hidrológico 2001.

5.3.2.2 Evolución de la *CE* en los desagües

La Tabla 5.9 presenta los estadísticos de la *CE* determinada en las 1.074 muestras diarias de agua de drenaje recogidas en las estaciones de control de los desagües D-XIX-6, D-XXV-3 y D-XXX-3 durante el año hidrológico 2001 y las estaciones de no riego (oct-00/mar-01) y riego (abr-01/sep-01).

La *CE* de los tres desagües es baja, presentando siempre valores inferiores a 1,60 dS/m. La *CE* media anual más alta corresponde a D-XIX-6 (1,05 dS/m), favorecida por la disolución de sales del sustrato terciario.

D-XXV-3, cuyas aguas también están en contacto con materiales terciarios, presenta menor *CE* (CE_{media}= 0,78 dS/m) debido a la dilución que se produce con los aportes de las filtraciones del Canal de Bardenas cuyas aguas presentan una baja salinidad (CE_{CB}= 0,33 dS/m).

D-XXX-3 presenta la menor *CE* media (CE_{media}=0,54 dS/m), la menor variabilidad (*CV*= 10%) y el menor valor máximo (0,77 dS/m) ya que sus aguas circulan por materiales cuaternarios sin sales y están en menor contacto con el sustrato terciario.

D-XXV-3 y D-XIX-6 presentan mayor variabilidad ($CV_{D\text{-}XXV\text{-}3}$= 32% y $CV_{D\text{-}XIX\text{-}6}$= 23%) y los valores máximos más altos ($máx_{D\text{-}XXV\text{-}3}$= 1,60 dS/m y $máx_{D\text{-}XIX\text{-}6}$= 1,57 dS/m) consecuencia de la mayor salinidad de las aguas de drenaje en contacto con materiales terciarios.

Tabla 5.9. Media (*m*), coeficiente de variación (*CV*), máximo y mínimo de la *CE* para las 1.074 muestras diarias de agua de drenaje tomadas en D-XIX-6, D-XXV-3 y D-XXX-3 durante el año hidrológico 2001. Media y coeficiente de variación (*CV*) para las estaciones de no riego (oct-00/mar-01) y riego (abr-01/sep-01).

Desagüe	año hidrológico oct-00/sept-01				no riego		riego	
	m (dS/m)	*CV* (%)	*máx* (dS/m, fecha)	*mín* (dS/m, fecha)	*m* (dS/m)	*CV* (%)	*m* (dS/m)	*CV* (%)
D-XIX-6	1,05	23	1,57 (31/12/00)	0,38 (26/05/01)	1,24	13	0,87	19
D-XXV-3	0,78	32	1,60 (02/11/00)	0,37 (01/04/01)	0,90	31	0,65	22
D-XXX-3	0,54	10	0,77 (04/08/01)	0,41 (16/05/01)	0,56	6	0,52	11

Los valores máximos se presentaron tras períodos sin aportes de agua (sin riego y sin precipitaciones importantes) y los mínimos coinciden con vertidos directos de agua de riego sobre los desagües (colas de acequia) que provocaron la dilución de sus aguas hasta valores próximos al agua de riego (0,33 dS/m).

La *CE* de los desagües evoluciona según el régimen hídrico y la salinidad de los materiales geológicos que están en contacto con las aguas de drenaje (Fig. 5.20). Así, la *CE* descendió ante los mayores caudales circulantes en época de riego y tras eventos de lluvia, siendo menor en los desagües que drenan flujos subterráneos diluidos por las filtraciones del Canal de Bardenas (D-XXV-3 y D-XXX-3) y en el desagüe que drena la cuenca con materiales geológicos menos salinos (D-XXX-3).

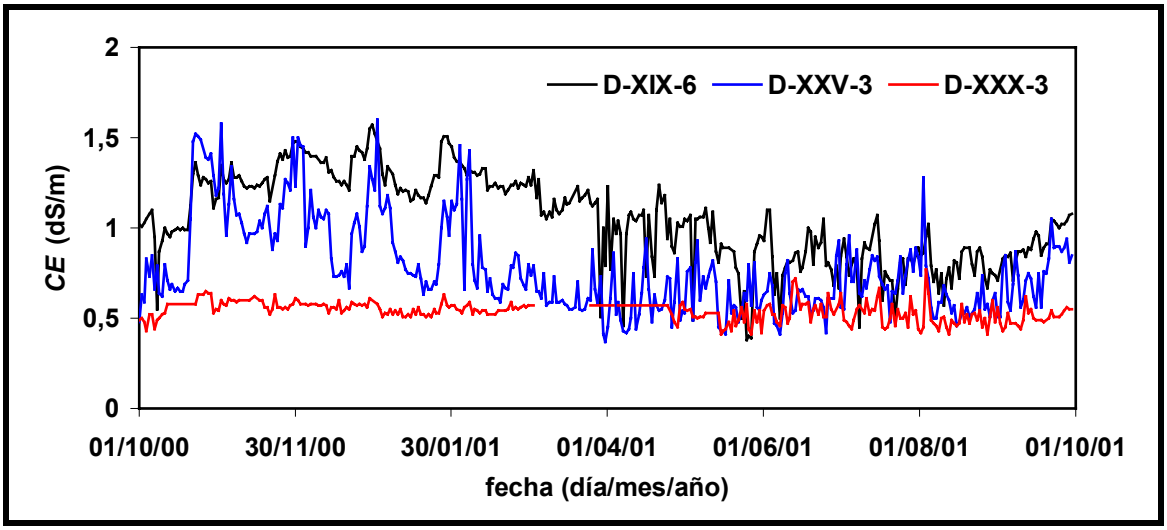


Figura 5.20. Evolución de la *CE* diaria (dS/m) durante el año hidrológico 2001 en los desagües D-XIX-6, D-XXV-3 y D-XXX-3.

La *CE* media de la estación de riego fue menor que la de no riego debido al efecto diluente de las aguas de riego de buena calidad. Este hecho se refleja en la relación entre la *CE* en la estación de riego y la *CE* en la estación de no riego, que varió entre 0,7 para D-XIX-6 y D-XXV-3, y 0,9 para D-XXX-3 reflejando dicho efecto diluente del riego.

5.3.2.3 Evolución de la [NO_3^-] en los desagües

La [NO_3^-] presente en las aguas de los desagües estudiados fue alta, con valores máximos de 215 mg/L (Tabla 5.10). Al igual que para la *CE*, D-XIX-6 registró las mayores concentraciones ([NO_3^-]$_{media}$= 116 mg/L) y únicamente 16 de los días del año hidrológico estudiado (4%) presentaron valores menores del límite sanitario (50 mg/L). El segundo desagüe con [NO_3^-] más alta es D-XXX-3 ([NO_3^-]$_{media}$= 74 mg/L) donde se registraron valores menores a 50 mg/L en 46 días (13%). La [NO_3^-] más baja se presentó en D-XXV-3 ([NO_3^-]$_{media}$= 48 mg/L) registrándose valores inferiores al límite sanitario en 225 días del año (62%).

La [NO_3^-] media registrada en D-XIX-6 (116 mg/L) fue superior a las registradas en D-XXV-3 y D-XXX3, ya que estos desagües reciben filtraciones del Canal de Bardenas. Entre estas últimas D-XXX-3 presentó [NO_3^-] medias más altas que D-XXV-3 (74 frente a 48 mg/L) debido fundamentalmente a los mayores aportes de nitrógeno por fertilización en su cuenca (357 frente a 203 kg N/ha).

El efecto diluente del riego observado para la *CE* se mantuvo para la [NO_3^-] de los desagües D-XIX-6 y D-XXX-3 donde la relación de la [NO_3^-] media en los períodos de riego y no riego fue de 0,7 (D-XIX-6) y 0,8 (D-XXX-3). Sin embargo, en el desagüe D-XXV-3 esta relación fue de 1,3 (esto es, mayor concentración media en el período de riego que en el de no riego). Ello es debido a que las cuencas asociadas a D-XIX-6 y D-XXX-3 presentan suelos de saso regados por inundación con eficiencias relativamente bajas que provocan elevados volúmenes de drenaje de baja [NO_3^-]. Por el contrario, la cuenca asociada a D-XXV-3 presenta un 40% de su superficie cultivable con suelos de valle regados por aspersión con eficiencias relativamente altas que provocan menores volúmenes de drenaje pero de mayor [NO_3^-].

En el polígono de La Violada, regado por inundación, también se observaron menores [NO_3^-] en la estación de riego que en la de no riego (Isidoro, 1999), mientras que en los desagües de dos cuencas de Monegros II regadas por aspersión la [NO_3^-] en la estación de riego y no riego fue similar (Cavero, comunicación personal).

La variabilidad de la [NO_3^-] diaria es más alta que la variabilidad de la *CE* debido a que el rango de variación entre [NO_3^-]$_{riego/lluvia}$ y [NO_3^-]$_{drenaje\ del\ suelo}$ es mayor que el rango de variación entre $CE_{riego/lluvia}$ y $CE_{drenaje\ del\ suelo}$. Esta circunstancia es más extrema en D-XXX-3 (CV_{CE}= 10%, $CV_{[NO3-]}$= 35%) cuyos suelos poseen bajos contenidos en sales pero altos en nitrato susceptible de ser lavado.

Tabla 5.10. Media (*m*), coeficiente de variación (*CV*), máximo y mínimo de la [NO_3^-] para las 1.074 muestras diarias de agua de drenaje tomadas en D-XIX-6, D-XXV-3 y D-XXX-3 durante el año hidrológico 2001. Media (*m*) y coeficiente de variación (*CV*) para las estaciones de no riego (oct-00/mar-01) y riego (abr-01/sep-01).

Desagüe	año hidrológico oct-00/sept-01				no riego		riego	
	m (mg/L)	*CV* (%)	*máx* (mg/L, fecha)	*mín* (mg/L, fecha)	*m* (mg/L)	*CV* (%)	*m* (mg/L)	*CV* (%)
D-XIX-6	116	32	215 (08/03/01)	23 (26/05/01)	138	24	94	27
D-XXV-3	48	43	116 (27/09/01)	8 (01/04/01)	42	40	55	41
D-XXX-3	74	35	182 (18/06/01)	16 (04/10/01)	80	25	68	41

La evolución de la [NO_3^-] (Fig. 5.21) sigue los ciclos marcados por el riego, las lluvias y el contenido de nitrato disponible en el suelo para ser lavado. Éste sufre importantes variaciones en el tiempo, dependiendo del cultivo y del manejo de la fertilización nitrogenada.

Para una misma fracción de drenaje (volumen de agua drenado respecto al aplicado en riego y lluvia), un mayor contenido de nitrato en el suelo supone un aumento de la [NO_3^-] del agua de drenaje subsuperficial. Así, los primeros riegos tras la aplicación de fertilizantes provocan [NO_3^-] más altas en el agua de los desagües rompiendo la tendencia descendente de la época de riego. Con el paso del tiempo el contenido de nitrato en el suelo disminuye progresivamente a causa del lavado inducido por los sucesivos riegos y la extracción de los cultivos provocando un descenso progresivo en la [NO_3^-] del agua de drenaje hasta el final del ciclo de los cultivos de verano (Fig. 5.21).

Este fenómeno se observa claramente en D-XXX-3 (Fig. 5.21). Los suelos de su cuenca reciben grandes aportes de nitrógeno en el mes de junio a causa del abonado de cobertera del maíz. Los primeros riegos tras este abonado se producen a mediados de junio coincidiendo con los aumentos de [NO_3^-] registrados en el desagüe. A partir de este momento la [NO_3^-] vuelve a descender hasta el cese del riego.

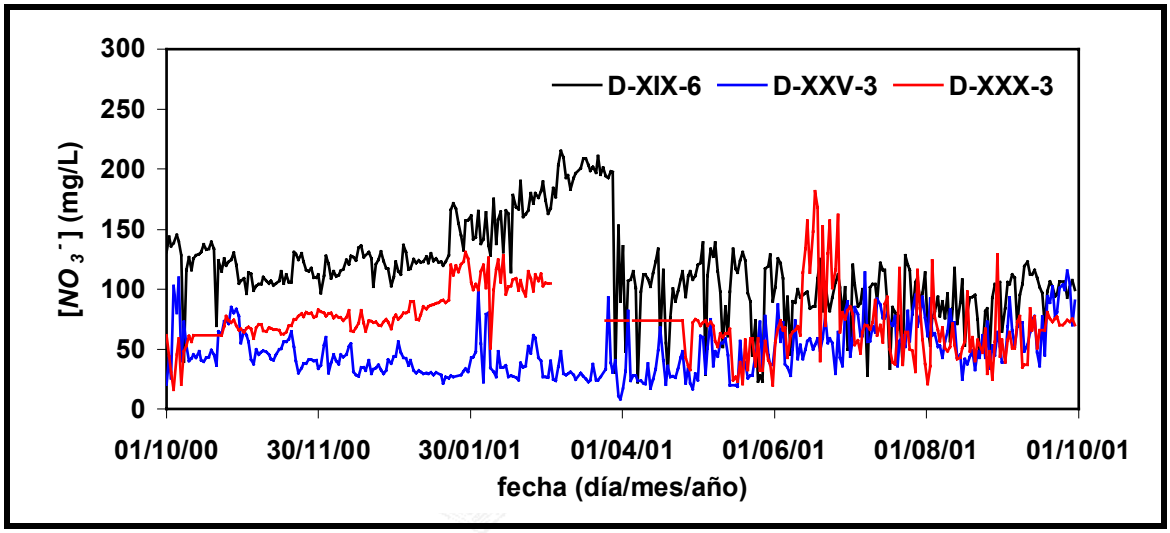


Figura 5.21. Evolución de la [NO_3^-] diaria (mg/L) durante el año hidrológico 2001 en los desagües D-XIX-6, D-XXV-3 y D-XXX-3.

5.3.2.4 Evolución de la masa de sales y nitrato en los desagües

La Tabla 5.11 presenta las masas de sales y nitrato exportadas por los tres desagües durante el año hidrológico 2001 y en sus estaciones de riego y no riego.

El desagüe D-XXV-3 exportó la mayor masa de sales (995 t/año) ya que por él circularon los mayores caudales (68 L/s de media anual). Le sigue D-XIX-6 (611 t/año) que a pesar de presentar los menores caudales (34 L/s) posee la salinidad más alta ($CE_{\text{media anual}}$= 1,05 dS/m).

La menor masa de sales exportada correspondió a D-XXX-3 (566 t/año) ya que presentó la menor salinidad ($CE_{\text{media anual}}$= 0,54 dS/m) y no es capaz de drenar todo el flujo subterráneo. En los tres desagües la masa de sales exportada en la estación de riego fue superior a la de no riego (la relación entre riego/no riego osciló entre 1,1 y 3,6 según desagües) ya que los mayores caudales circulantes por los desagües en la estación de riego predominaron sobre la mayor salinidad en la estación de no riego.

La masa anual de nitrato exportada fue similar en los tres desagües (entre 100 y 114 t/año) ya que las diferencias presentadas en los caudales fueron compensadas por las distintas concentraciones. Las diferencias encontradas entre la estación de riego y no riego (la relación riego/no riego osciló entre 2,0 y 3,9 según desagües) son superiores a las presentadas para las sales, ya que además de los mayores caudales ocasionados por el drenaje del riego se suma el mayor lavado de nitrato ocasionado por la aplicación mayoritaria de fertilizantes en época de riego.

Tabla 5.11. Masas de sales y nitrato exportadas por los desagües D-XIX-6, D-XXV-3 y D-XXX-3 durante el año hidrológico 2001 y las estaciones de no riego (oct-00/mar-01) y riego (abr-01/sep-01).

Desagüe	masa de sales (t)			masa de nitrato (t)		
	año hidrológico	no riego	riego	año hidrológico	no riego	riego
D-XIX-6	611	215	396	103	34	69
D-XXV-3	995	475	520	100	32	68
D-XXX-3	566	122	444	114	23	91

La evolución diaria en la masa de sales y nitrato para los tres desagües (Figs. 5.22 y 5.23) confirma que las mayores masas de sales y nitrato exportadas corresponden a épocas de lluvias y riegos. Durante estos períodos las menores concentraciones de las aguas son contrarrestadas por unos caudales más elevados.

Durante el invierno D-XXX-3 es el desagüe que presenta la menor masa de sales disueltas, debido a su menor salinidad y caudal. Con la llegada del riego los mayores caudales provocan que la masa de sales exportada se asemeje a la de las otras cuencas con aguas más salinas (Fig. 5.22).

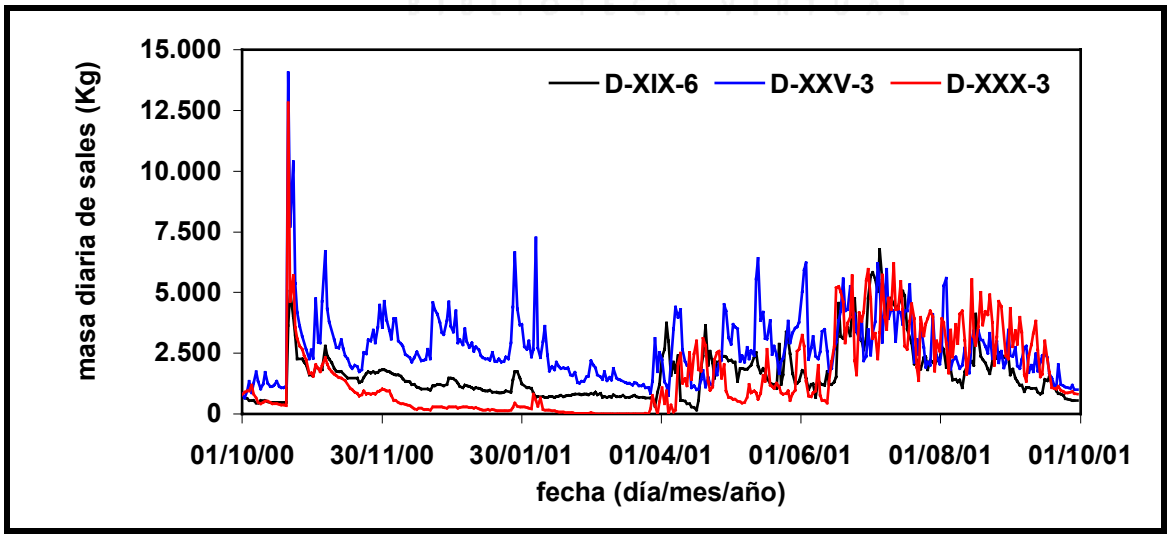


Figura 5.22. Evolución diaria de la masa de sales (Kg) exportada por los desagües D-XIX-6, D-XXV-3 y D-XXX-3 durante el año hidrológico 2001.

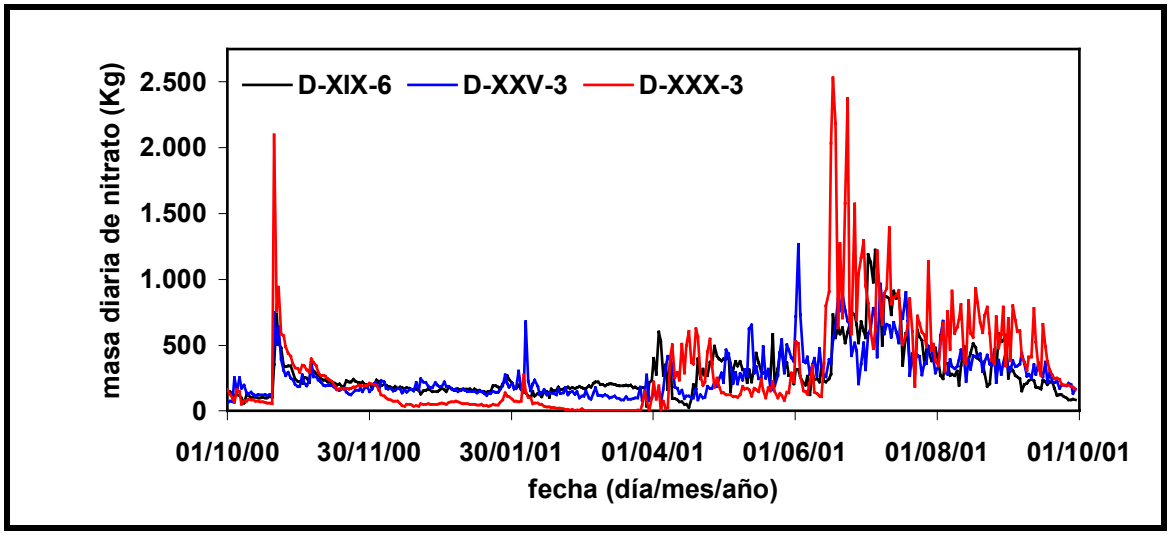


Figura 5.23. Evolución diaria de la masa de nitrato (Kg) exportada por los desagües D-XIX-6, D-XXV-3 y D-XXX-3 durante el año hidrológico 2001.

Este efecto es más evidente en la masa de nitrato exportada ya que las mayores dosis de fertilizantes nitrogenados aplicados en la cuenca C-XXX-3 provocan un mayor lavado de nitrato. Tras los primeros riegos posteriores al abonado de cobertera del maíz (a partir de julio), la masa de nitrato exportada desciende (Fig. 5.23) al disminuir el nitrato disponible en el suelo para ser lavado.

Las masas de sales y nitratos exportadas diariamente por los desagües están relacionadas linealmente con sus caudales diarios (Fig. 5.24). La peor relación se establece en el desagüe D-XXV-3 debido a la variabilidad de los suelos que drena y la mejor en el desagüe D-XXX-3 que drena únicamente suelos de saso. En el desagüe D-XIX-6 la relación está afectada por una serie de muestras tomadas cuando en el desagüe se vertían colas de acequia produciendo elevados caudales y dilución de las aguas, pero sin aumentar la masa de sales o nitrato (puntos en la parte inferior derecha de la figura).

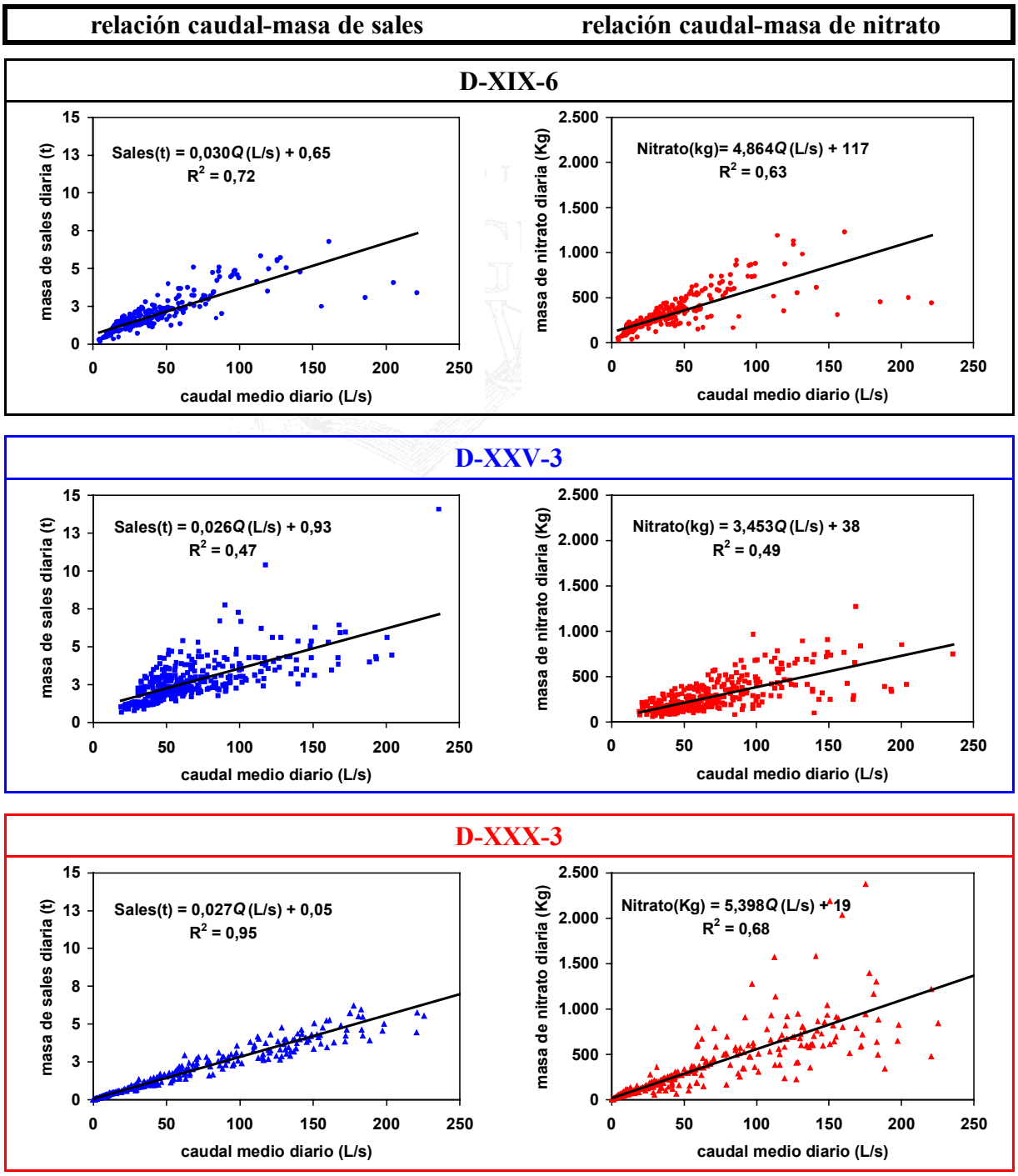


Figura 5.24. Regresión lineal entre el caudal medio diario (*Q*, L/s) y las masas diarias de sales (t) y nitrato (Kg) exportadas por los tres desagües controlados durante el año hidrológico 2001.

La relación lineal del caudal y la masa de sales en disolución es en general mejor que la relación entre el caudal y la masa de nitrato. El ejemplo más claro se presenta en el desagüe D-XXX-3 donde la buena relación entre el caudal y la masa de sales (R^2= 0,95) disminuye considerablemente para el caudal y la masa de nitrato (R^2= 0,68) favorecido por la presencia de una serie de muestras recogidas en los primeros riegos tras el abonado de cobertera del maíz, que presentan elevados caudales y masas de nitrato en disolución. Una razón fundamental de que las regresiones sal-caudal sean mejores que nitrato-caudal es que en las primeras sólo afecta el caudal (muy condicionado por el manejo del riego), mientras que en las segundas afecta también el manejo de fertilizantes, lo que introduce más ruido en dichas relaciones.

La pendiente de las rectas de regresión entre las variables estudiadas nos muestran las características de los suelos que drena cada desagüe. La escasa diferencia en la pendiente de las rectas caudal-masa de sales de los tres desagües es debida a la semejanza en el contenido de sales de los suelos drenados por cada desagüe y a la dilución de las aguas con colas de acequia y/o filtraciones del Canal de Bardenas. Las pendientes de las rectas caudal-masa de nitrato son mayores para aquellos desagües que drenan mayoritariamente suelos de saso (D-XXX-3 > D-XIX-6 > D-XXV-3) en los cuales hay un mayor lixiviado de nitrato.

5.3.3 Drenaje subterráneo en C-XXX-3

El flujo subterráneo circula en el acuífero de Miralbueno durante todo el año según una componente principal de dirección Norte-Sur por lo que dentro de la cuenca C-XXX-3 existe un flujo subterráneo entrante por el Norte y otro flujo subterráneo saliente por el Sur (Fig. 5.25). Los mapas de niveles freáticos elaborados separadamente para la estación de riego y no riego (Fig. 5.25) muestran que el gradiente hidráulico (i) es ligeramente inferior en la estación de riego que en la de no riego ($i_{oct-mar}$= 1,15%, $i_{abr-sept}$= 1,06%).

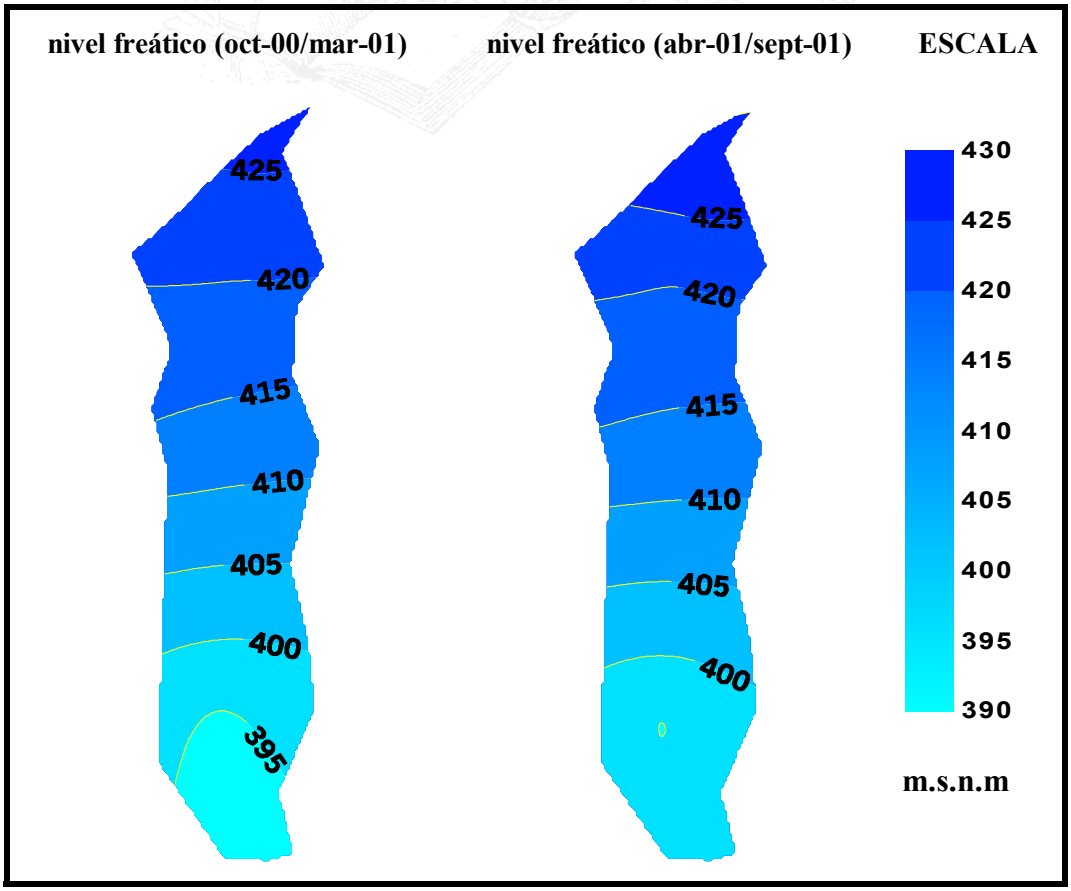


Figura 5.25. Piezometría (equidistancia=5 m) del acuífero de Miralbueno en la cuenca C-XXX-3 para las estaciones de no riego (oct-00/mar-01) y riego (abr-01/sept-01).

El drenaje subterráneo, mucho menos variable que el drenaje superficial, oscila según el nivel freático del acuífero (Fig. 5.26) y supone en esta cuenca el 56% del drenaje total. Este porcentaje se incrementó notablemente en los períodos marcados por la ausencia de riegos y precipitaciones llegando a constituir el 100% del drenaje (marzo de 2001).

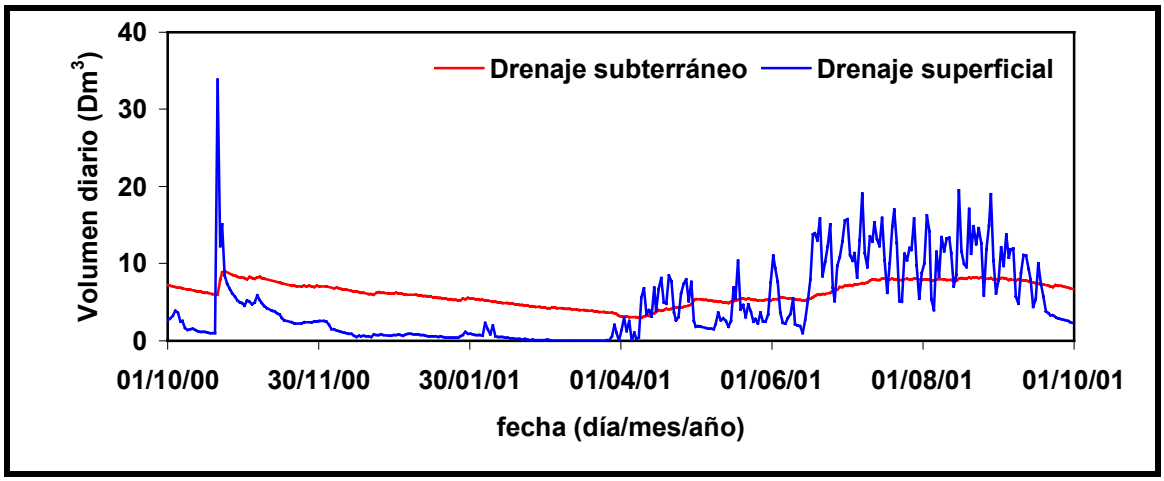


Figura 5.26. Evolución diaria del volumen de drenaje superficial y subterráneo (Dm^3) en la cuenca D-XXX-3 durante el año hidrológico 2001.

La salinidad y [NO_3^-] del flujo subterráneo entrante en la cuenca C-XXX-3 es muy similar durante todo el año hidrológico (*CE*= 0,56 dS/m; [NO_3^-]= 60 mg/L), pero la calidad (*CE* y [NO_3^-]) del agua subterránea evoluciona espacialmente de forma distinta en las estaciones de no riego y de riego (Fig. 5.27 y 5.28).

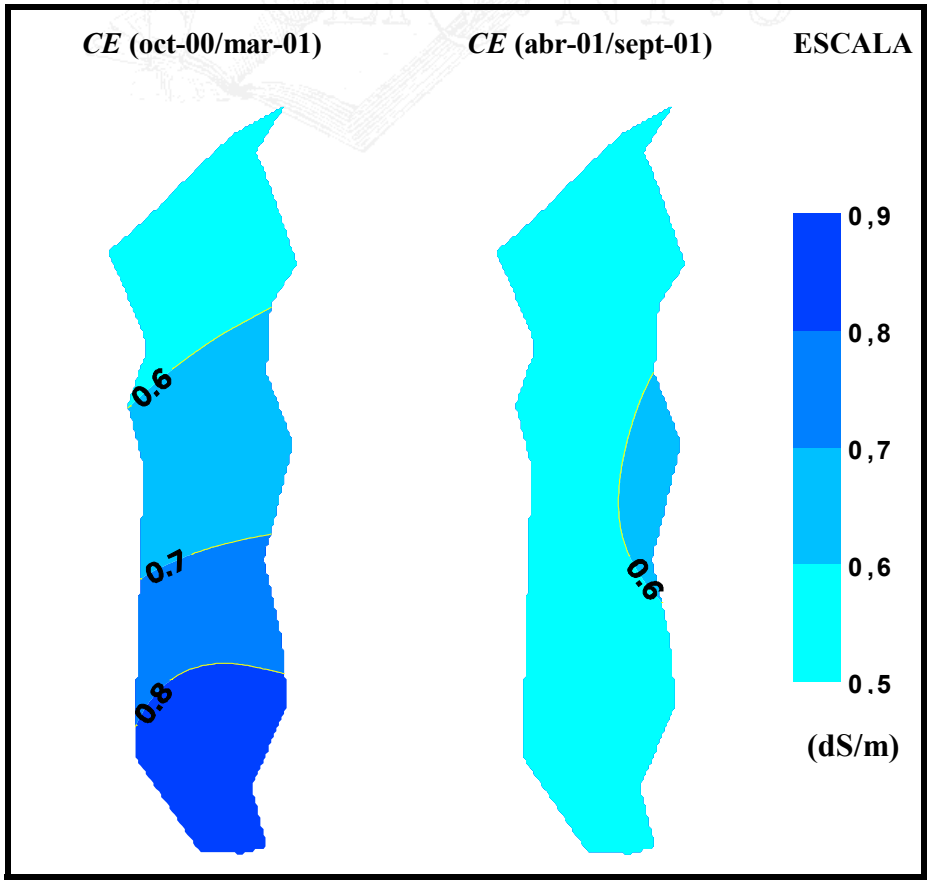


Figura 5.27. Mapas de isolíneas de *CE* (equidistancia=0,1 dS/m) del acuífero de Miralbueno en la cuenca C-XXX-3 para las estaciones de no riego (oct-00/mar-01) y riego (abr-01/sept-01).

Durante la estación de no riego, las lluvias provocan el lavado de las sales introducidas en el suelo con el agua de riego. Este proceso, unido a la progresiva disolución de las sales procedentes de los materiales geológicos que están en contacto con las aguas del acuífero, hace aumentar la *CE* en la dirección del flujo ($CE_{entrante}$= 0,56 dS/m, $CE_{saliente}$= 0,82 dS/m).

La [NO_3^-] de las aguas subterráneas en la época de no riego (oct-00/mar-01) también aumenta progresivamente según la dirección del flujo ($[NO_3^-]_{entrante}$= 60 mg/L, $[NO_3^-]_{saliente}$= 110 mg/L) (Fig. 5.28).

El tiempo transcurrido entre lluvias favorece la acumulación de nitrato en el suelo debido a la mineralización de la materia orgánica. Cada nueva lluvia provoca el lavado del nitrato aportando flujos de elevada concentración al escaso volumen de agua almacenado en el acuífero durante la época de no riego. A partir de abril el riego intensivo proporciona elevados volúmenes de baja salinidad y [NO_3^-] (excepto en momentos puntuales) llegando a provocar descensos moderados de la *CE* y [NO_3^-] según la dirección del flujo ($CE_{entrante}$= 0,56 dS/m, $CE_{saliente}$= 0,52 dS/m y $[NO_3^-]_{entrante}$= 60 mg/L, $[NO_3^-]_{saliente}$= 40 mg/L).

Este comportamiento de la *CE* y [NO_3^-] en el drenaje de suelos agrícolas en la época de riego y no riego es típico del regadío y se ha observado en otros estudios como los realizados por Isidoro (1999) en La Violada o por Saad (1999) en lisímetros con cultivo de maíz.

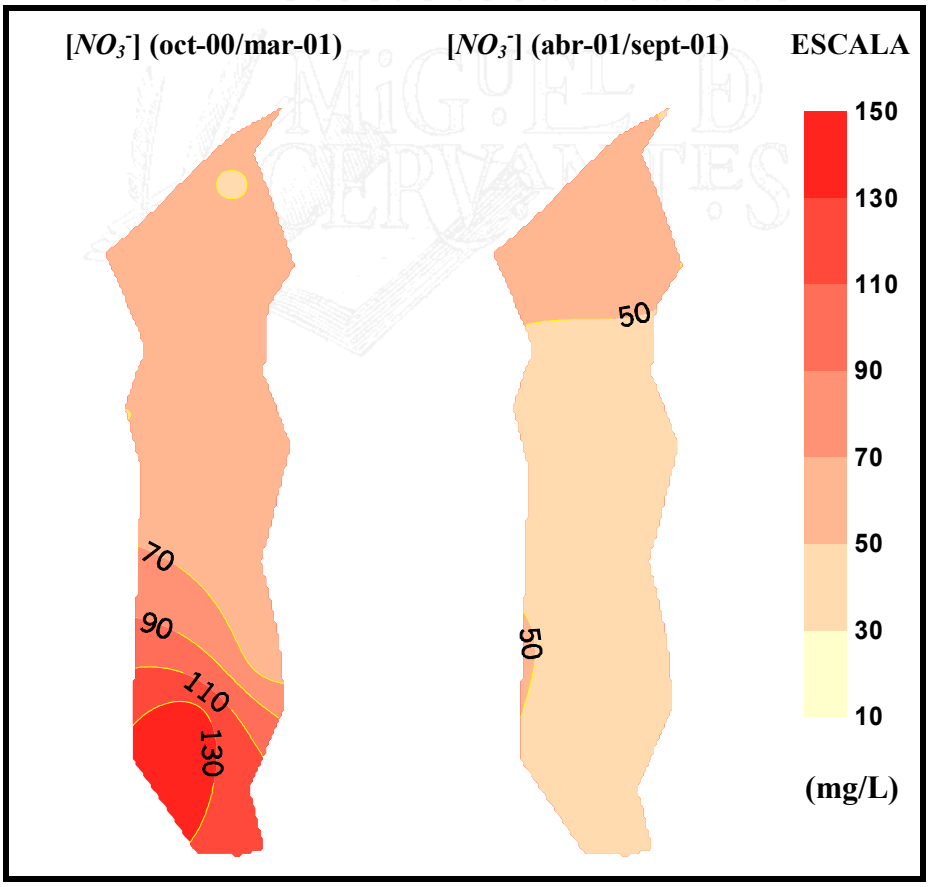


Figura 5.28. Mapas de isolíneas de [NO_3^-] (equidistancia= 10 mg/L) del acuífero de Miralbueno en la cuenca C-XXX-3 (oct-00/mar-01 y abr-01/sept-01).

5.3.4 Balance hídrico anual (año hidrológico 2001)

5.3.4.1. Componentes del balance de agua en el suelo (*BAS*)

Los componentes del balance hídrico en el suelo (*R, LL,* ET_R y *D*) del año hidrológico 2001 obtenidos por integración de los valores diarios de todas las *UPRC* de cada cuenca y de la superficie sin cultivar se presentan en la Tabla 5.12. Los valores de ET_R y *D* son valores estimados utilizando el modelo *BAS*.

Las diferencias entre las entradas y salidas constituyen la variación de agua en el suelo (*VS*) entre el estado inicial (1 de octubre de 2000) y el final (30 de septiembre de 2001) e incluyen también los posibles errores cometidos en la medida o estimación de cada uno de los componentes del balance. Estas diferencias son muy inferiores al resto de componentes del balance hídrico y suponen ligeros incrementos de agua en los suelos de C-XIX-6 y C-XXV-3 (23 y 18 mm, respectivamente) y una escasa disminución en C-XXX-3 (1 mm).

Dado que los datos de precipitación se han tomado de la misma estación meteorológica, las lluvias suponen un aporte idéntico en las tres cuencas (*LL*= 526 mm). En C-XXV-3 las entradas por riego ($R_{C\text{-}XXV\text{-}3}$= 669 mm) superaron ligeramente a las entradas por lluvia (526 mm) mientras que las entradas por riego en C-XIX-6 ($R_{C\text{-}XIX\text{-}6}$= 1.112 mm) y C-XXX-3 ($R_{C\text{-}XXX\text{-}3}$= 1.396 mm) duplicaron y casi triplicaron respectivamente a las ocasionadas por las lluvias.

Las salidas por evapotranspiración están muy condicionadas por la distribución de cultivos; así C-XXV-3 con una mayor superficie sin cultivar presentó la menor ET_R (681 mm), y C-XIX-6 y C-XXX-3, con una distribución de cultivos similar, también presentaron una ET_R similar (859 y 810 mm respectivamente).

De acuerdo con los volúmenes de riego aplicados, C-XXX-3 presenta el mayor volumen de drenaje (1.113 mm) seguido por C-XIX-6 (755 mm) y C-XXV-3 (495 mm).

Tabla 5.12. Componentes del balance de agua en el suelo de C-XIX-6, C-XXV-3 y C-XXX-3 durante el año hidrológico 2001: entradas de agua por riego (*R*) y lluvia (*LL*), salidas de agua por evapotranspiración real (ET_R) y drenaje (*D*) estimadas por *BAS*, y diferencia entre entradas y salidas (*VS*). Valores absolutos (Dm^3) y por unidad de superficie de la cuenca (mm).

CUENCA	ENTRADAS				SALIDAS				E - S	
	R		*LL*		ET_R		*D*		*VS*	
	Dm^3	mm	Dm^3	mm	Dm^3	mm	Dm^3	mm	Dm^3	mm
C-XIX-6	1.055	1.112	499	526	816	859	717	755	+21	+ 23
C-XXV-3	996	669	784	526	1.014	681	738	495	+28	+ 18
C-XXX-3	3.018	1.396	1.138	526	1.752	810	2.407	1.113	- 3	- 1

Los volúmenes de drenaje medidos en los desagües D-XIX-6 y D-XXV-3 durante el año hidrológico en estudio (Fig. 5.29) fueron superiores a los estimados por *BAS* (un 33 y un 62%) debido a que en estas cuencas se produce un importante aporte subterráneo del exterior (*FSE*) que es drenado y contabilizado en el desagüe.

D-XXV-3 muestra diferencias similares durante todo el año hidrológico como consecuencia de un aporte constante de agua por filtraciones del Canal de las Bardenas. Sin embargo D-XIX-6, que no recibe aportaciones debidas a las pérdidas del Canal, sólo presenta diferencias importantes durante los meses de riego cuando el drenaje de las parcelas en regadío situadas al Norte de la cuenca sobre el glacis de Miraflores es importante.

La tendencia se invierte en D-XXX-3, donde el drenaje estimado por *BAS* durante el año hidrológico es un 40% superior al medido en el desagüe. El flujo subterráneo saliente en C-XXX-3 es igual al entrante más el flujo subterráneo generado en la propia cuenca y que no es drenado por el desagüe.

Las máximas diferencias entre el drenaje medido en D-XXX-3 y el estimado por *BAS* se presentaron en abril coincidiendo con el inicio de la época de riego y los menores niveles piezométricos. En este mes el drenaje estimado por *BAS* fue un 138% superior al medido en el desagüe.

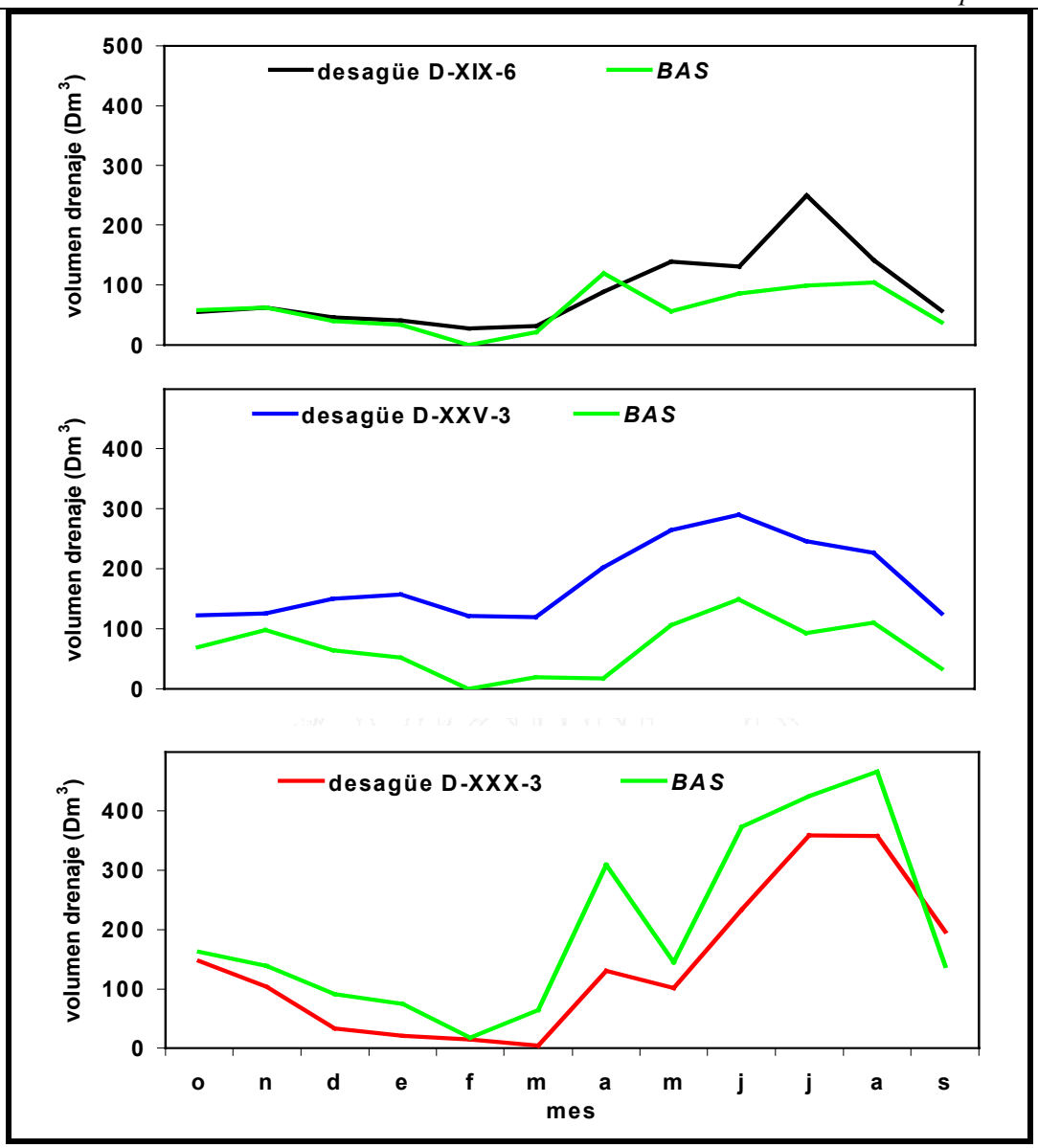


Figura 5.29. Evolución del volumen de drenaje mensual (Dm^3) calculado mediante *BAS* y el medido en los desagües D-XIX-6, D-XXV-3 y D-XXX-3 durante el año hidrológico 2001.

5.3.4.2. Balance global de agua en las cuencas

La Tabla 5.13 presenta los flujos subterráneos entrantes (*FSE*) estimados por diferencia entre el drenaje superficial y subterráneo, el drenaje interno (*DSP+DSB-D*) en las tres cuencas y el drenaje subterráneo (*DSB*) estimado en C-XXX-3 durante el año hidrológico 2001.

Las pérdidas del Canal de Bardenas y el agua procedente del sector Norte del acuífero de Miralbueno provocan que el flujo subterráneo entrante en C-XXV-3 (1.413 Dm^3) y C-XXX-3 (1.531 Dm^3) sea 4 veces superior al entrante en C-XIX-6 (353 Dm^3). Las dimensiones de la sección de entrada de C-XXV-3 y C-XXX-3 justifican la similitud en el aporte de flujos subterráneos.

Tabla 5.13. Flujo subterráneo entrante (*FSE*) y drenaje subterráneo (*DSB*) en las cuencas C-XIX-6, C-XXV-3 y C-XXX-3 durante el año hidrológico 2001.

Cuenca	*FSE* (Dm^3)	*DSB* (Dm^3)
C-XIX-6	353	0
C-XXV-3	1.413	0
C-XXX-3	1.531	2.234

El flujo subterráneo (*FSE*) supuso el mayor porcentaje de agua entrante en C-XXV-3 (44% de las entradas totales) y el segundo mayor en C-XXX-3 (27%), únicamente superado por el riego (53%) (Fig. 5.30).

La contribución del drenaje superficial a las salidas de agua (ET_R, *DSP* y *DSB*) en C-XXV-3 y C-XIX-6 es alta (68% y 57% respectivamente) debido a que sus desagües drenan los flujos propios de la cuenca y el flujo subterráneo procedente del exterior. Por el contrario, D-XXX-3 es incapaz de drenar todo el flujo subsuperficial, por lo que el drenaje subterráneo contribuye mayoritariamente a las salidas totales de la cuenca (39%).

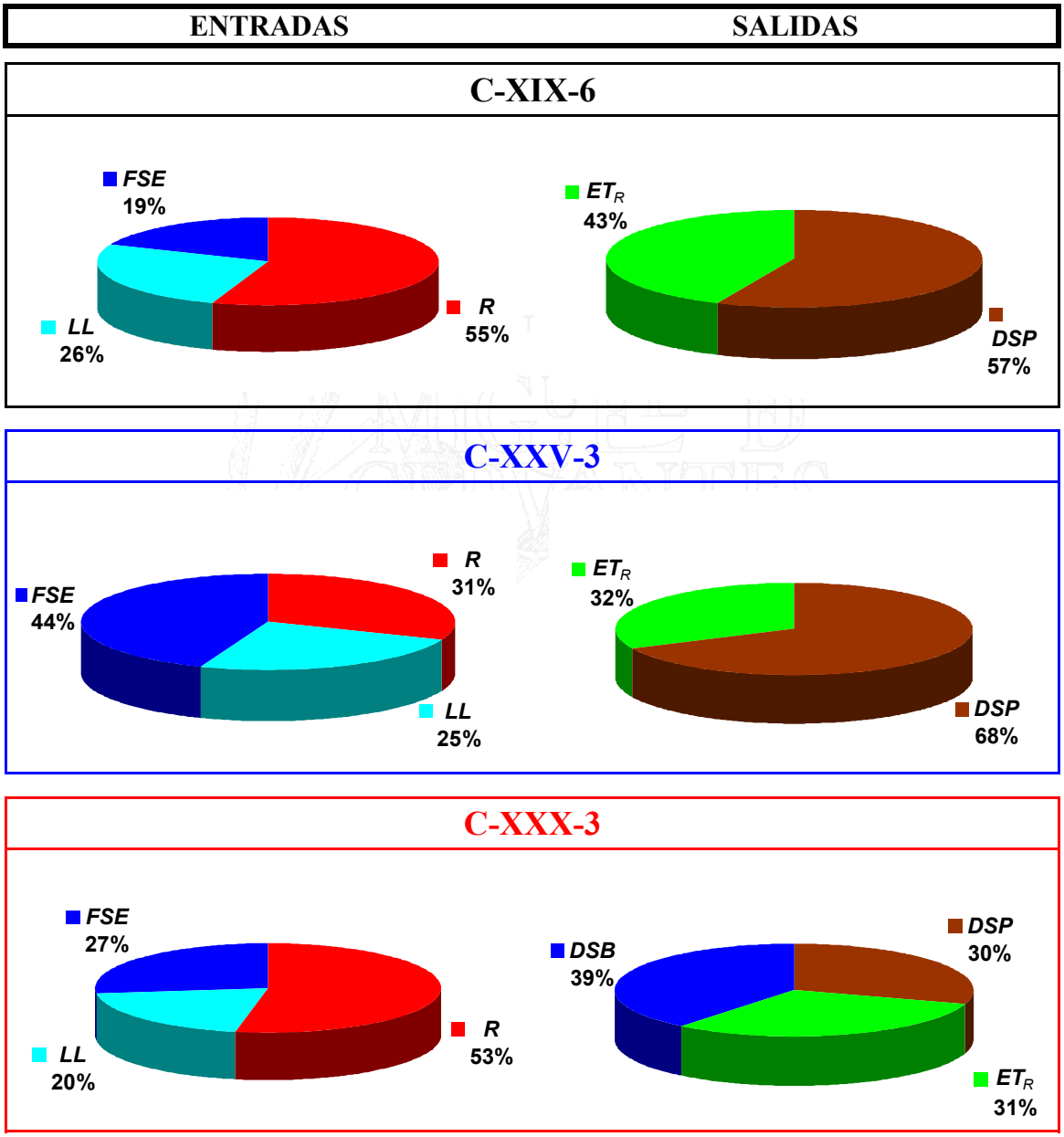


Figura 5.30. Distribución, en porcentaje del total, de las entradas de agua por riego (*R*), lluvia (*LL*) y flujo subterráneo entrante (*FSE*) y las salidas por evapotranspiración (ET_R), drenaje superficial (*DSP*) y drenaje subterráneo (*DSB*) en C-XIX-6, C-XXV-3 y C-XXX-3 durante el año hidrológico 2001.

5.3.5 Balance de sales anual (año hidrológico 2001)

La Tabla 5.14 presenta las entradas y salidas de sales durante el año hidrológico 2001 en cada una de las cuencas. La diferencia entre entradas y salidas es el resultado de los procesos de precipitación-disolución de sales. El balance muestra el dominio de la disolución sobre la precipitación de sales en las tres cuencas ($E\text{-}S < 0$). En este sentido, la disolución de la

calcita presente en los suelos de las tres cuencas podría ser la principal fuente de sales. El flujo subterráneo supuso elevadas proporciones en las entradas de sales a las cuencas (Fig. 5.31).

Tabla 5.14. Componentes del balance de sales en C-XIX-6, C-XXV-3 y C-XXX-3 durante el año hidrológico 2001: entradas de sales en el agua de riego (*SR*), lluvia (*SLL*) y flujo subterráneo entrante (*SFSE*), salidas de sales en el drenaje superficial (*SDSP*) y subterráneo (*SDBS*) y diferencia entre entradas y salidas (*DIS*).

CUENCA	ENTRADAS (t)			SALIDAS (t)		*E-S (t)*
	SR	*SLL*	*SFSE*	*SDSP*	*SDSB*	*DIS*
C-XIX-6	200	24	223	611	0	-164
C-XXV-3	189	38	484	995	0	-284
C-XXX-3	573	55	553	566	1.006	-391

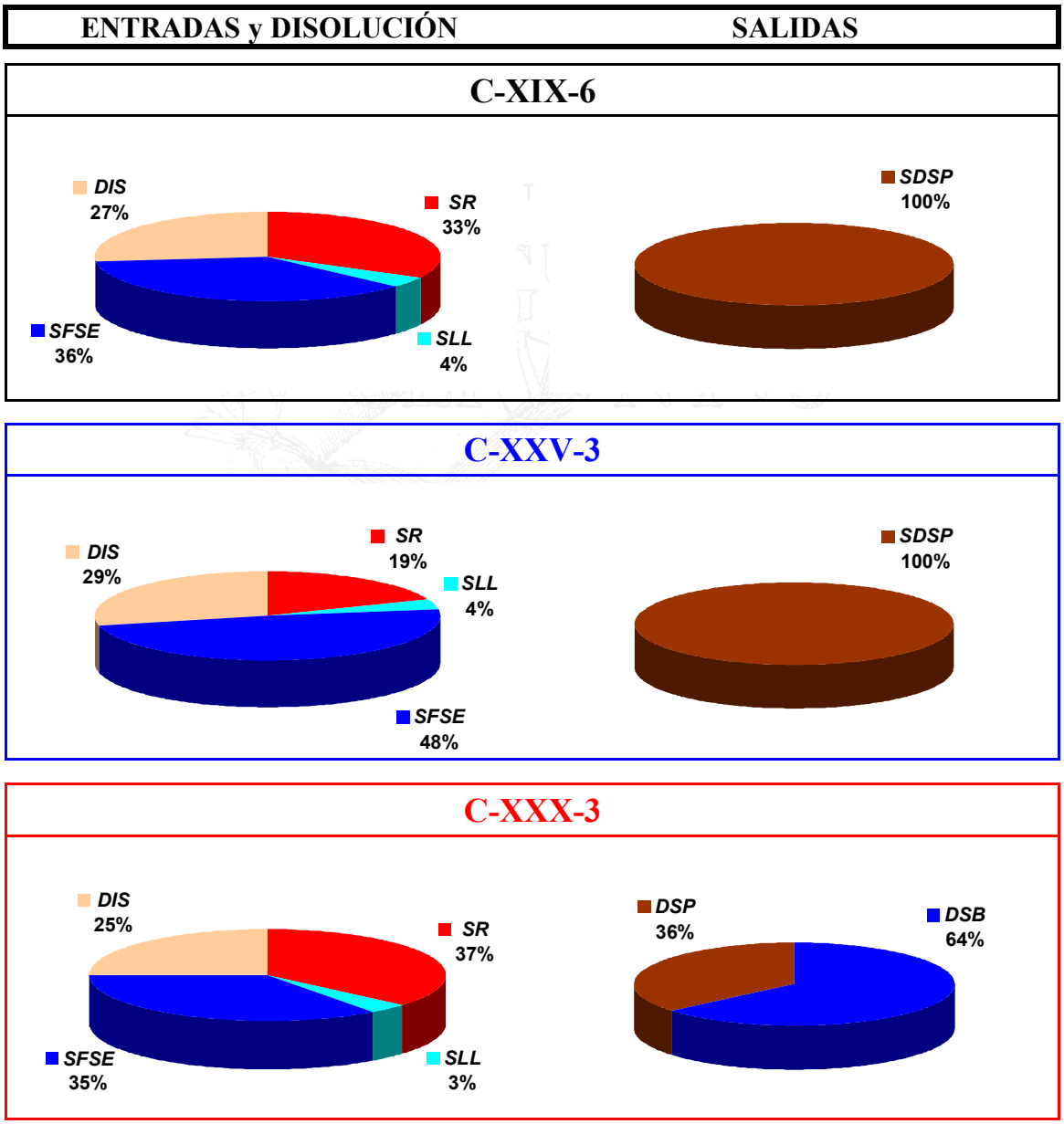


Figura 5.31. Distribución, en porcentaje del total, de las entradas de sales por el agua de riego (*SR*), lluvia (*SLL*), flujo subterráneo entrante (*SFSE*) y disolución (*DIS*), y las salidas por drenaje superficial (*DSP*) y drenaje subterráneo (*DSB*) en C-XIX-6, C-XXV-3 y C-XXX-3 durante el año hidrológico 2001.

El menor volumen de flujo subterráneo entrante en C-XIX-6 (353 Dm^3) fue compensado por su mayor salinidad (1,0 dS/m). Dado que no existe drenaje subterráneo de las cuencas C-XIX-6 y C-XXV-3, la masa de sales exportada es atribuible únicamente al drenaje

superficial a través de sus desagües. En C-XXX-3 el drenaje subterráneo exportó el 64% de la masa de sales. Este porcentaje es superior al del drenaje de agua subterránea (56% del drenaje total de agua) indicando la mayor concentración del agua subterránea frente a la superficial.

Los valores unitarios de la masa de sales estimada en el drenaje interno (*SD*), junto a los aportes por riego y lluvia y la disolución de sales se presentan en la Tabla 5.15. Exceptuando el flujo subterráneo entrante que únicamente circula por la cuenca, el riego fue el componente que mayor masa de sales aportó a las cuencas con suelos de saso ($R_{C\text{-}XXX\text{-}3}$= 2,65 t/ha, $R_{C\text{-}XIX\text{-}6}$= 2,11 t/ha). La disolución de sales fue similar en las tres cuencas ($DIS_{XIX\text{-}6}$= 1,73 t/ha, $DIS_{XXV\text{-}3}$= 1,91 t/ha, $DIS_{XXX\text{-}3}$= 1,81 t/ha) destacando que C-XXV-3, con volúmenes de riego menores y materiales geológicos más salinos, presentó el mayor aporte por disolución superando la masa de sales introducida por el riego en esta cuenca.

Las sales aportadas con el agua de riego marcan las diferencias en la masa de sales exportada en el drenaje interno ($C_{C\text{-}XXX\text{-}3}$= 4,71 t/ha, $C_{C\text{-}XIX\text{-}6}$= 4,09 t/ha, $C_{C\text{-}XXV\text{-}3}$= 3,43 t/ha). Estos valores difieren considerablemente de los medidos en los desagües ($D_{C\text{-}XXX\text{-}3}$= 2,62 t/ha, $D_{C\text{-}XIX\text{-}6}$= 6,44 t/ha, $D_{C\text{-}XXV\text{-}3}$= 6,68 t/ha) alertándonos de los errores que se pueden cometer (por exceso o por defecto) en cuencas donde haya entradas o salidas subterráneas relevantes, y de la necesidad de conocer la hidrogeología de las áreas de estudio.

Tabla 5.15. Masa de sales en el drenaje propio de la cuenca (*SD*) y aporte de sales por el riego (*SR*), lluvia (*SLL*) y disolución (*DIS*) en las cuencas durante el año hidrológico 2001.

Cuenca	ENTRADAS		DISOLUCIÓN	SALIDAS
	SR (t/ha)	*SLL* (t/ha)	*DIS* (t/ha)	*SD* (t/ha)
C-XIX-6	2,11	0,25	1,73	4,09
C-XXV-3	1,27	0,25	1,91	3,43
C-XXX-3	2,65	0,25	1,81	4,71

5.3.6 Balance de nitrógeno anual (año hidrológico 2001)

La Tabla 5.16 presenta las entradas y salidas de nitrógeno en las tres cuencas. Las diferencias entre las entradas y salidas (*O*), atribuibles a diversos procesos no tenidos en cuenta en los balances, suponen en las tres cuencas unas salidas de nitrógeno considerables.

Tabla 5.16. Componentes del balance de nitrógeno en C-XIX-6, C-XXV-3 y C-XXX-3 durante el año hidrológico 2001: entradas de nitrógeno en el agua de riego (*NR*), lluvia (*NLL*), flujo subterráneo entrante (*NFSE*), fertilización (*FN*) y fijación simbiótica (*NFS*), salidas de nitrógeno en el drenaje superficial (*NDSP*), drenaje subterráneo (*NDBS*) y cosechas (*NC*), y diferencia entre entradas y salidas (*O*).

CUENCA	ENTRADAS (Kg)					SALIDAS (kg)			*E - S (Kg)*
	NR	*NLL*	*NFSE*	*NF*	*NFS*	*NDSP*	*NDSB*	*NC*	*O*
C-XIX-6	291	62	13.095	21.114	17.443	23.275	0	24.154	4.576
C-XXV-3	274	97	19.145	21.765	9.941	22.605	0	18.830	9.787
C-XXX-3	832	141	20.795	75.362	21.209	25.682	37.170	43.963	11.524

La mayor entrada de nitrógeno en las tres cuencas se debe a la fertilización de los cultivos (*NF*). Las elevadas dosis de nitrógeno aplicadas en C-XXX-3 (357 Kg N/ha) provocan que el aporte por fertilización suponga el 63% de las entradas en esta cuenca (Fig. 5.32).

Las otras dos entradas principales de nitrógeno fueron la fijación simbiótica, relacionada con la superficie de alfalfa (entre el 18% y el 34%) y los flujos subterráneos entrantes (entre el 18% y el 37%). La masa de nitrógeno importada por la lluvia y el riego fue muy inferior al resto de componentes contribuyendo en las tres cuencas con un 1%.

Las salidas de nitrógeno se repartieron mayoritariamente entre la masa exportada en las cosechas ($NC_{C\text{-}XIX\text{-}6}$= 46%, $NC_{C\text{-}XXV\text{-}3}$= 38%, $NC_{C\text{-}XXX\text{-}3}$= 37%) y la asociada a los flujos de

drenaje ($NDSP_{C\text{-}XIX\text{-}6}$= 45%, $NDSP_{C\text{-}XXV\text{-}3}$= 45%. $NDSP+NDSB_{C\text{-}XXX\text{-}3}$= 53%). En C-XXX-3, los porcentajes de agua y nitrógeno exportados en los flujos subterráneos con respecto al drenaje total son similares (56% para el agua y 58% para masa de nitrógeno) indicando que la concentración de nitrato del drenaje superficial y subterráneo fue igual. El resultado de la dilución del agua del desagüe D-XXX-3 por las escorrentías de las parcelas fue similar al resultado de la dilución del agua subterránea por las filtraciones del Canal de Bardenas.

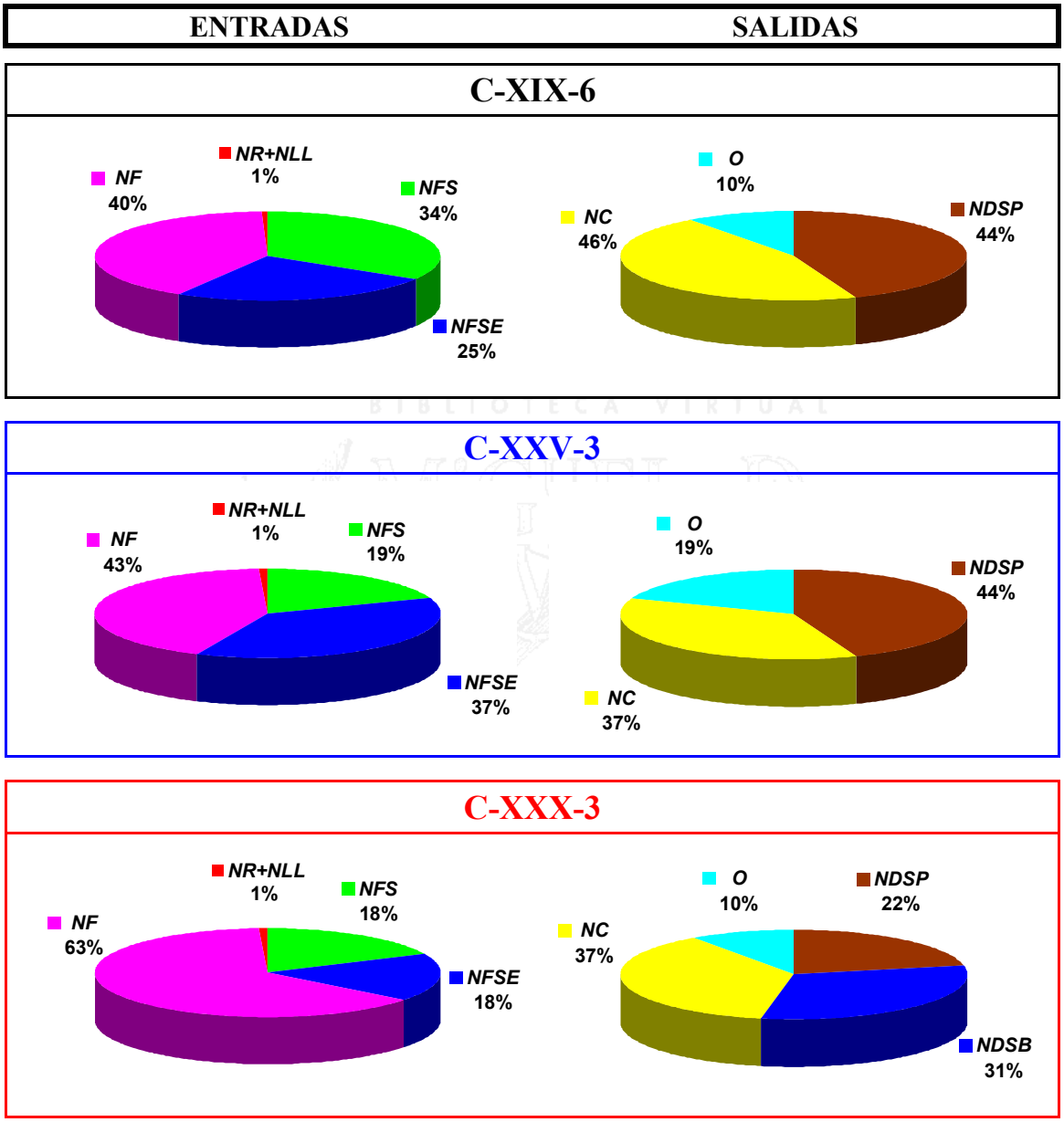


Figura 5.32. Distribución, en porcentaje del total, de las entradas de nitrógeno por el agua de riego (*NR*), lluvia (N*LL*), flujo subterráneo entrante (N*FSE*), fertilización (*FN*) y fijación simbiótica (*FS*), y las salidas por el drenaje superficial (*DSP*), drenaje subterráneo (*DSB*), cosechas (*NC*) y otros componentes no considerados (*O*) en C-XIX-6, C-XXV-3 y C-XXX-3 durante el año hidrológico 2001.

Los valores de masa de nitrógeno por unidad de superficie total de cada cuenca se presentan en la Tabla 5.17 para el drenaje interno (*ND*), los aportes por riego (*NR*), lluvia (*NLL*), fertilización (*NF*) y fijación simbiótica (*NFS*), las extracciones por los cultivos (*NC*) y la diferencia entre entradas y salidas (*O*).

La fertilización nitrogenada (*NF*) fue el principal factor responsable de la masa de nitrógeno exportada a través del drenaje (*ND*), ya que la masa de nitrógeno introducida en las aguas de riego y lluvia fue muy pequeña y que se ha asumido que el nitrógeno fijado por la alfalfa fue exportado de las cuencas en las cosechas.

Al igual que en las sales, la masa de nitrógeno exportada en el drenaje ($ND_{C\text{-}XIX\text{-}6}$= 98 Kg/ha, $ND_{C\text{-}XXV\text{-}3}$= 23 Kg/ha, $ND_{C\text{-}XXX\text{-}3}$= 185 Kg/ha) difiere considerablemente de los valores medidos en los desagües ($D_{C\text{-}XIX\text{-}6}$= 245 Kg/ha, $D_{C\text{-}XXV\text{-}3}$= 152 Kg/ha, $D_{C\text{-}XXX\text{-}3}$= 119 Kg/ha).

Los factores no tenidos en cuenta en el balance (*O*) constituyeron una salida de nitrógeno similar para las tres cuencas ($O_{C\text{-}XIX\text{-}6}$= 57 Kg/ha, $O_{C\text{-}XXV\text{-}3}$= 66 Kg/ha, $O_{C\text{-}XXX\text{-}3}$= 53 Kg/ha). La magnitud de estos valores frente a la masa de nitrógeno exportada en los flujos de drenaje muestra la importancia de dichos factores a la hora de realizar un balance de nitrógeno.

Tabla 5.17. Masa de nitrógeno en el drenaje propio de la cuenca (*ND*), extraído por las cosechas (*NC*) y exportado como resultado de los componentes no considerados (*O*), y aporte de nitrógeno por el riego (*NR*), lluvia (*NLL*), fertilización (*NF*) y fijación simbiótica (*NFS*) en las cuencas durante el año hidrológico 2001.

Cuenca	ENTRADAS (Kg/ha)				SALIDAS (Kg/ha)		
	NR	*NLL*	*NF*	*NFS*	*ND*	*NC*	*O*
C-XIX-6	3	1	222	184	98	254	57
C-XXV-3	2	1	146	67	23	126	66
C-XXX-3	4	1	349	98	195	203	53

5.3.7 Calidad del riego

El balance diario de agua en el suelo indica que el 80% de las *UPRC* de las tres cuencas presenta un riego deficitario (*DH* > 0); esto es, en algún momento del ciclo del cultivo el contenido de agua en el suelo no fue suficiente para cubrir sus necesidades hídricas.

Exceptuando una *UPRC* de girasol con riego muy deficiente (*DH*= 57%), el *DH* osciló entre 0 y 16,2%. La presencia de *DH* coincide con las *UPRC* situadas sobre suelos de saso con una capacidad de retención de agua limitada (*CRA*= 85 mm) regadas por inundación con intervalos de tiempo entre riegos excesivamente largos para las necesidades de los cultivos en las épocas de mayor demanda de agua. Por el contrario, aquellos cultivos desarrollados en suelos de valle con una capacidad de retención de agua suficiente (*CRA*= 176 mm) para no llegar al agotamiento hídrico con los intervalos de riego de la zona, dispusieron de agua durante todo su ciclo vegetativo (*DH*= 0%).

El manejo del riego realizado en la CR-V no tuvo en cuenta las precipitaciones debido a la inflexibilidad de los turnos de riego. Los sistemas de riego por inundación no permiten tener un control absoluto de las dosis aplicadas. En los suelos de saso regados por inundación, debido a que son muy permeables y el agua infiltra rápidamente, se aplican dosis superiores a las de los suelos de valle y mayores a sus *CRA,* por lo que cada riego lleva asociada una pérdida de agua por drenaje. Las pérdidas son mayores en aquellas *UPRC* que reciben más riegos, como las alfalfas, por la duración de su ciclo vegetativo y las hortalizas por su reducido sistema radicular que requiere riegos más frecuentes.

A efectos ilustrativos, la Figura 5.33 recoge el comportamiento del agua útil en el suelo de dos parcelas de maíz con diferente suelo y sistema de riego. Los incrementos en el agua útil corresponden a la aplicación de riegos. La *UPRC* en el suelo de saso recibió 7 riegos, de los cuales el primero (riego de huebra, 26/04/01) se destinó a optimizar la humedad del suelo (tempero) para la siembra del maíz (13/05/01), y los seis posteriores se aplicaron para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo con un intervalo medio entre ellos de 15 días y una dosis media de riego de 144 mm. Cada riego incrementó la humedad del suelo hasta capacidad de campo y una vez alcanzado este valor, el resto de la dosis de riego se perdió por drenaje debajo de la zona de raíces. El inadecuado manejo del riego en turnos excesivamente largos derivó en períodos del ciclo del maíz en los que la reserva de agua útil en el suelo fue cero, por lo que el cultivo sufrió estrés hídrico, disminuyendo su rendimiento productivo.

La *UPRC* situada sobre un suelo de valle se regó por aspersión en 9 ocasiones. El intervalo entre riegos en esta *UPRC* fue de 15 días, con dosis de 30 mm en los tres primeros

riegos, de nascencia, y de 72 mm en el resto de los riegos. Los cuatro primeros riegos incrementaron la humedad del suelo hasta capacidad de campo perdiéndose el exceso de agua aplicado por drenaje. A pesar del elevado intervalo entre riegos, la mayor *CRA* de los suelos de valle permitió que en todo momento el suelo contuviese agua disponible para las plantas.

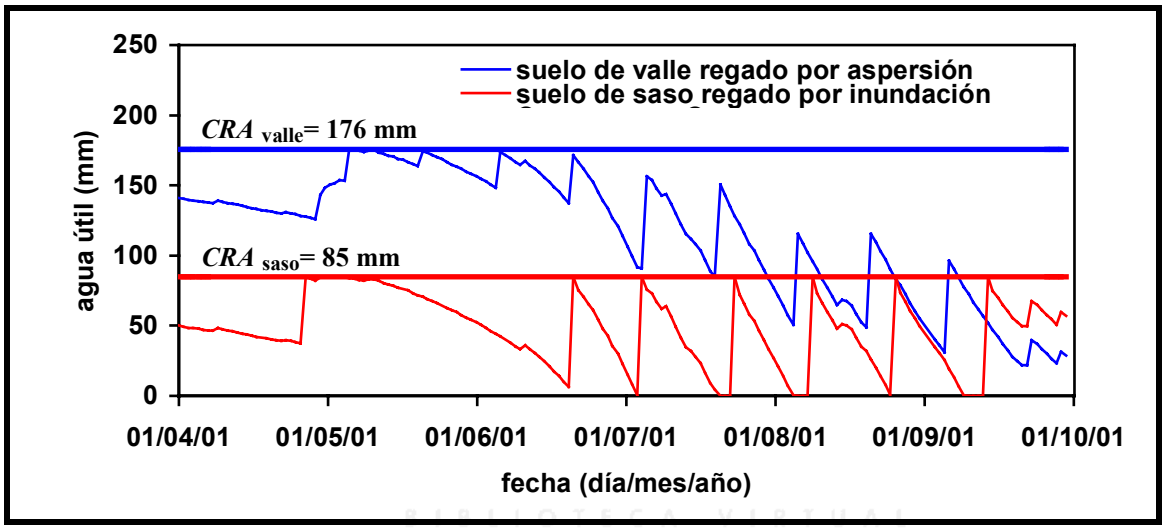


Figura 5.33. Agua útil diaria calculada por *BAS* entre el 1 de abril y el 30 de septiembre de 2001 para dos *UPRC* de maíz en suelo de saso regado por inundación y suelo de valle regado por aspersión.

Durante el año de estudio (oct-00/sept-01) el incremento en la duración de los turnos de riego y el cese prematuro de éste el 18 de septiembre de 2001 por agotamiento del agua embalsada en el pantano de Yesa (abastecimiento de agua de riego en el polígono de Bardenas) contribuyó notablemente al déficit hídrico.

La Tabla 5.18 presenta los valores estimados de la eficiencia del uso consuntivo del agua [$EUCA= ET_R / (R+LL+AU_{inicial})$] y *DH* medio ponderado por la superficie de regadío para cada cuenca. C-XXV-3 presenta la mayor *EUCA* (62,2%) favorecida por unas *UPRC* situadas sobre suelos de valle y con riego por aspersión.

El *DH* de C-XXV-3 (6,7%) estuvo incrementado por el riego muy deficiente de una *UPRC* de girasol (*DH*= 57%). El *DH* medio del resto de la cuenca fue del 2,0%, inferior al estimado para C-XIX-6 y C-XXX-3.

Las cuencas C-XIX-6 y C-XXX-3 poseen una distribución de cultivos similar, suelos de saso y un mismo sistema de riego; sin embargo, la peor disposición de C-XXX-3 para el riego por superficie (extensas parcelas sin nivelación láser y suelos más permeables) condicionó una menor *EUCA* ($EUCA_{C\text{-}XIX\text{-}6}$= 56%, $EUCA_{C\text{-}XXX\text{-}3}$= 44%). El riego en estas dos cuencas no fue capaz de satisfacer la demanda de agua de los cultivos siendo más deficiente en C-XXX-3 ($DH_{C\text{-}XIX\text{-}6}$= 3,4% y $DH_{C\text{-}XXX\text{-}3}$= 4,6%).

Dado que las dosis de riego aplicadas en estas cuencas elevan la humedad del suelo hasta capacidad de campo, el *DH* se asoció a la excesiva duración de los turnos de riego para las características de sus suelos.

Tabla 5.18. Eficiencia del uso consuntivo del agua (*EUCA*), déficit hídrico (*DH*), y fracción de drenaje (*FD*) en las cuencas C-XIX-6, C-XXV-3 y C-XXX-3 durante el año hidrológico 2001.

	C-XIX-6	C-XXV-3	C-XXX-3
***EUCA* (%)**	56,0	62,2	44,5
***DH* (%)**	3,4	6,7 (2,0[1])	4,6
***FD* (%)**	44,6	37,4	56,7

[1]Valor medio sin considerar una parcela de girasol con un *DH* del 57%

La Figura 5.34 presenta la evolución mensual de la *EUCA* y del *DH* en las tres cuencas durante la estación de riego. El comienzo de la estación de riego presenta la menor *EUCA* en las cuencas con riego por inundación y suelos de saso (C-XIX-6 y C-XXX-3); sin embargo se presenta la mayor *EUCA* para la cuenca con riego por aspersión y suelos de valle (C-XXV-3). Los primeros riegos por inundación son los menos eficientes y los que merecen un mayor control en las cuencas C-XIX-6 y C-XXX-3.

En cuanto al *DH* destaca el brusco ascenso en el mes de junio para la cuenca C-XXX-3. Este incremento se debe principalmente al retraso en el primer riego tras la huebra del maíz y al cese en el riego de los cereales de invierno. El ascenso del *DH* en las tres cuencas al final de la estación de riego (septiembre) se debe al cese prematuro del riego, por agotamiento del agua embalsada en el pantano de Yesa.

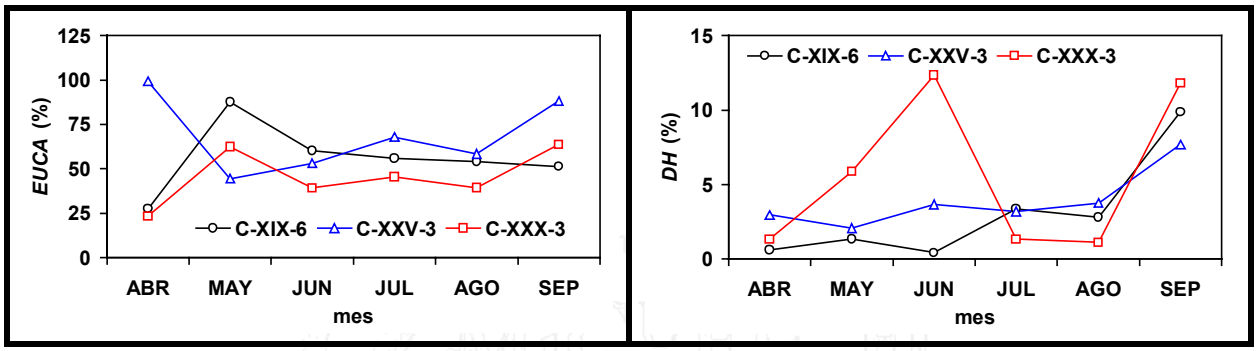


Figura. 5.34. Evolución mensual de la *EUCA* (%) y del *DH* (%) para las cuencas C-XIX-6, C-XXV-3 y C-XXX-3 durante la estación de riego abr-01/sept-01.

La fracción de drenaje (*FD*) en el año de estudio estuvo muy condicionada por la *EUCA* durante el ciclo vegetativo de los cultivos. Así la menor *FD* correspondió a C-XXV-3 (37,4%), seguida de C-XIX-6 (44,6%) y de C-XXX-3 (56,7%). La *FD* de las cuencas con sistema de riego exclusivo por inundación, C-XIX-6 y C-XXX-3, es similar a la *FD* encontrada en el sistema de riegos de La Violada (Monegros I) regado por inundación (en torno al 50%; Quílez 1985; Isidoro, 1999). La *FD* de la cuenca C-XXV-3 (37, 4%), en la que el 39% de la superficie se riega por aspersión es inferior, aproximándose a los valores encontrados en zonas transformadas a riego presurizado como Monegros II (en torno al 10%) (Tedeschi, 2000).

Temporalmente, la *FD* en las cuencas C-XIX-6 y C-XXX-3 descendió ligeramente a lo largo de la estación de riego mientras que para C-XXV-3 la *FD* ascendió en mayo y junio como consecuencia de la aplicación de riegos de nascencia al maíz de las tierras fuertes más susceptibles al encostramiento (suelos de valle) (Fig. 5.35).

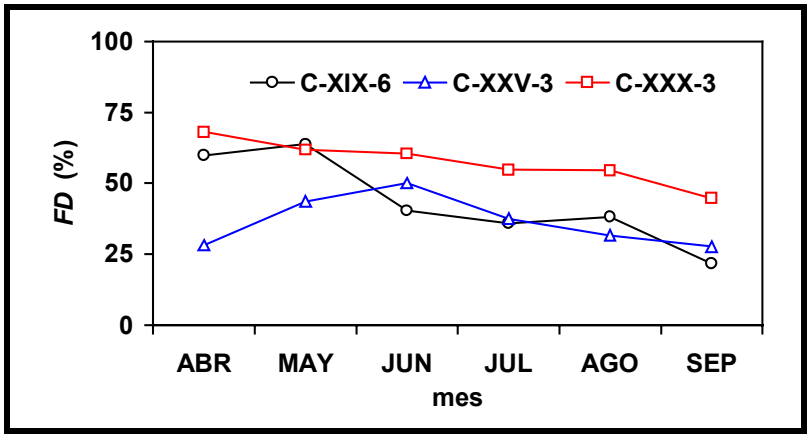


Figura. 5.35. Evolución mensual de la *FD* (%) para las cuencas C-XIX-6, C-XXV-3 y C-XXX-3 durante la estación de riego abr-01/sept-01.

La Figura 5.36 presenta la regresión entre los volúmenes de riego y lluvia aportados mensualmente (estación de riego y no riego) a las cuencas y el drenaje mensual (estación de riego y no riego) medido en las estaciones de control de los desagües. La pendiente de las rectas de regresión proporciona la fracción de drenaje media (en tanto por uno) de cada cuenca y el término independiente de estas rectas se corresponde con la diferencia entre los flujos subterráneos entrantes en las cuencas (*FSE*) y al agua subterránea que no es capaz de ser drenada por los desagües (*DSB*).

Los mayores aportes de agua a las cuencas y de drenaje a través de los desagües corresponden a los meses incluidos dentro de la estación de riego (abr-01/sep-01). Los menores valores pertenecen a la estación de no riego (oct-00/mar-01) salvo el mes de octubre de 2000 en el que se registraron abundantes precipitaciones.

Las fracciones de drenaje obtenidas a partir de las rectas de regresión son del mismo orden que las obtenidas anteriormente. En la figura 5.36 puede apreciarse como la *FD* de la cuenca C-XXV-3 (40%) es inferior a las cuencas con riego por inundación y suelos de saso (C-XIX-6: 56% y C-XXX-3: 46%).

El término independiente en C-XXV-3 (80 mm) es muy superior al término independiente en C-XIX-6 (16 mm) demostrando la mayor entrada de agua a la cuenca por flujos subterráneos. El término independiente en C-XXX-3 es negativo (-8 mm) confirmando que las salidas por drenaje subterráneo (*DSB*) en esta cuenca fueron superiores a las entradas por flujos subterráneos (*FSE*).

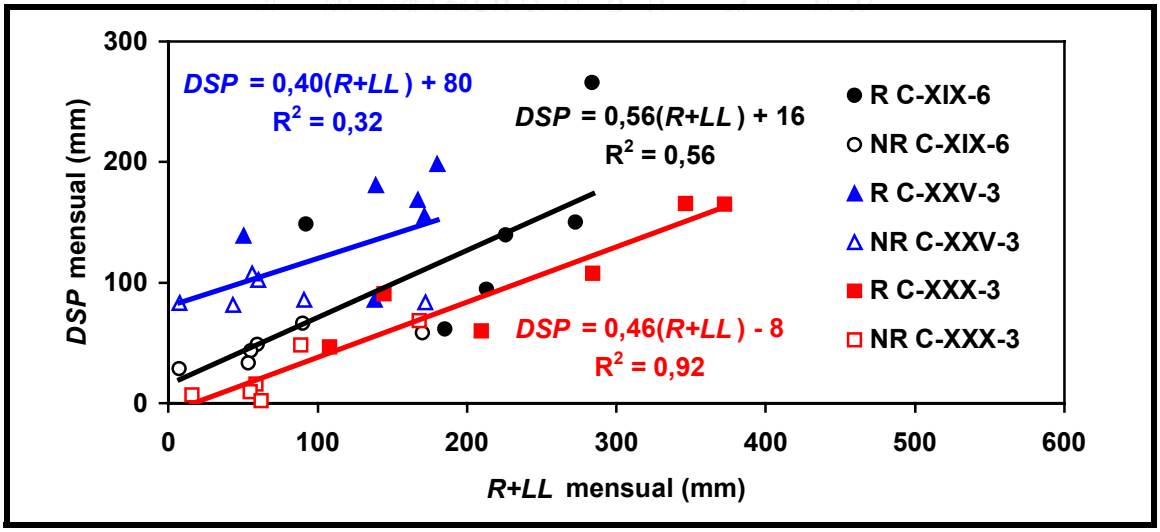


Figura 5.36. Regresión entre los volúmenes de riego y lluvia (*R+LL*, Dm^3) aportados mensualmente (estaciones de riego y no riego) a las cuencas C-XIX-6, C-XXV-3 y C-XXX-3, y el drenaje mensual (*DSP*, Dm^3) medido en los desagües D-XIX-6, D-XXV-3 y D-XXX-3 durante el año hidrológico 2001.

Teniendo en cuenta la baja pluviometría del área de estudio, el control de la *EUCA* y del *DH* dependen de un manejo adecuado del riego. Obviamente, este manejo condiciona la *FD* y por tanto el volumen de los flujos de retorno del regadío.

5.3.8 Efecto del manejo del riego y de la fertilización nitrogenada sobre la calidad de los flujos de drenaje propio de cada cuenca

La Tabla 5.19 presenta la *FD* de cada cuenca, la masa de sales exportada en el drenaje (*SD*), y su volumen (*D*) y concentración (*TDS*). Las mayores masas de sales en el drenaje propio de las cuencas, consecuencia de las sales aportadas con el riego y de las procedentes de materiales geológicos de la propia cuenca, son contrarrestadas por los mayores volúmenes de agua de drenaje, ocasionados por el volumen de riego y la eficiencia de éste, por lo que la concentración del drenaje propio de cada cuenca invierte la tendencia marcada por la masa.

Así, la mayor concentración del agua de drenaje se presentó en C-XXV-3 (693 mg/L) seguida de C-XIX-6 (541 mg/L) y de C-XXX-3 (423 mg/L). Estos valores asignados al drenaje propio de las cuencas difieren de los valores medios obtenidos para los desagües que las drenan (670 mg/L en C-XIX-6, 487 mg/L en C-XXV-3 y 344 mg/L en C-XXX-3) debido a que: (a) la hidrogeología de las cuencas condiciona la existencia de flujos subterráneos entrantes y salientes, (b) los desagües tienen un componente de escorrentía superficial mayor que el drenaje total y (c) las concentraciones medias obtenidas en los desagües no están ponderadas por el caudal.

Las relaciones entre *SD*, *D* y *TDS* respondieron a la fracción de drenaje de cada cuenca, de tal manera que una mayor *FD* provocó un mayor volumen de drenaje y una mayor masa de sales en disolución, pero una menor concentración salina. Este resultado es lógico, ya que en estos sistemas con pocas sales en el suelo el "efecto evapo-concentración" inducido por la *ET* de los cultivos predomina en general sobre el "efecto meteorización" inducido por la percolación profunda y la disolución de minerales. En otros sistemas como La Violada, con presencia de yeso en el suelo, la concentración de las aguas de drenaje es mucho más constante e independiente de la *FD*, ya que viene controlada por la solubilidad de este mineral (Quílez et al., 1987).

La masa de sales exportada por unidad de agua aplicada (riego más lluvia), baja en las tres cuencas, refleja las diferencias en el contenido de sales en los suelos de las cuencas. Así, C-XXV-3 (con suelos de valle desarrollados sobre el terciario lutítico) presenta un valor superior (2,85 kg/ha/mm) a C-XIX-6 (2,50 kg/ha/mm) y C-XXX-3 (2,45 kg/ha/mm) con suelos de saso de menor contenido en sales.

Tabla 5.19. Fracción de drenaje (*FD*), masa de sales exportada en el drenaje propio de las cuencas (*SD*), y volumen (*D*) y concentración (*TDS*) del agua de drenaje propio de las cuencas C-XIX-6, C-XXV-3 y C-XXX-3 durante el año hidrológico 2001.

Cuenca	*FD* (%)	*SD* (t/ha)	*D* (mm)	*TDS* (mg/L)
C-XIX-6	44,6	4,1	755	541
C-XXV-3	37,4	3,4	495	693
C-XXX-3	56,7	4,7	1.113	423

La masa de sales exportadas en el drenaje interno de los suelos de estas cuencas (entre 3,4 y 4,7 t/ha) fue similar a la encontrada por Basso (1994) para todo el polígono de Bardenas I (6 toneladas por hectárea regada y año) y sensiblemente inferior a las encontradas en otras zonas con materiales geológicos más salinos (entre 17 y 20 t/ha/año en el polígono de La Violada (Monegros I), Quílez (1985), Isidoro (1999), y 13,5 t/ha/año en Monegros II, Aragüés (1998).

Estos resultados indican que el manejo del riego juega un papel esencial en la masa de sales exportadas y en la calidad del agua de drenaje. La mayor eficiencia del riego (menor fracción de drenaje) provoca una menor masa de sales exportada y una mayor concentración salina. Ambos parámetros se incrementan con la salinidad del agua de riego y de los materiales geológicos, lo que aumenta la importancia del manejo del riego.

La Tabla 5.20 presenta la $[NO_3^-]$ media en el agua de drenaje propio (o drenaje interno del suelo) de las cuencas. C-XXX-3 y C-XIX-6 presentaron las mayores $[NO_3^-]$ (77 y 58 mg/L) distando mucho de la $[NO_3^-]$ de las aguas de drenaje de C-XXV-3 (21 mg/L). Este hecho tiene su justificación en los suelos de cada cuenca, los cultivos implantados y en el uso y manejo agronómico realizado (Apdo. 5.3.1). Sobre los suelos más permeables de C-XXX-3 y C-XIX-6 predominan los cultivos de maíz y en el caso de C-XXX-3 de hortalizas con una gran demanda de nitrógeno.

Los agricultores son conocedores de las perdidas de nitrógeno por lavado (sobre todo en los suelos de saso) e intentan compensarlo aumentando las dosis de fertilización. La sobredosis

unida al escaso fraccionamiento de las aplicaciones acumula una gran cantidad de fertilizante nitrogenado en el suelo que es incapaz de ser tomado por las plantas y, por lo tanto, queda disponible para su lavado aumentando la [NO_3^-] del agua de drenaje. En C-XXV-3, cuenca ganadera con predominio de cultivos de baja fertilización nitrogenada, con un 26% de su superficie sin cultivar y un 39% de la superficie regable utilizando el fertirriego, presenta la menor [NO_3^-] (21 mg/L) en sus aguas de drenaje.

Al igual que para las sales, la [NO_3^-] media del agua de drenaje propio de dos de las tres cuencas (58 mg/L en C-XIX-6, 21 mg/L en C-XXV-3 y 77 mg/L en C-XXX-3) difiere considerablemente de los valores medios obtenidos para los desagües que las drenan (116 mg/L en C-XIX-6, 48 mg/L en C-XXV-3 y 74 mg/L en C-XXX-3).

La masa de nitrógeno exportada (*ND*) por unidad de agua aplicada a cada cuenca (riego más lluvia) presenta unos valores mucho más variables que para la masa de sales. El valor en C-XXX-3 (0,10 Kg/ha/mm) llega a ser casi dos veces superior al de C-XIX-6 (0,06 Kg/ha/mm) y hasta 5 veces superior al de C-XXV-3 (0,02 Kg/ha/mm) resaltando que además de las dosis de riego influye decisivamente el manejo de la fertilización nitrogenada.

La masa de nitrógeno exportada (*ND*) por unidad de fertilización (*NF*) y agua aplicada (riego más lluvia) muestra valores muy similares para las cuencas C-XXX-3 ($2{,}9\cdot10^{-4}$ mm^{-1}) y C-XIX-6 ($2{,}6\cdot10^{-4}$ mm^{-1}) que poseen una distribución de cultivos similar, suelos de saso y riego por inundación. Entre ellas el menor valor corresponde a C-XIX-6 cuya *EUCA* es mayor. C-XXV-3, con una distribución de cultivos diferente y presencia de suelos de valle regados por aspersión con uso del fertirriego, presenta un valor muy inferior ($0{,}9\cdot10^{-4}$ mm^{-1}) indicando que la masa de nitrógeno exportada por unidad de agua y de fertilizante aplicados es sensiblemente menor.

Teniendo en cuenta que la práctica totalidad del nitrógeno lixiviado proviene de la superficie regada, la masa de nitrógeno exportada por hectárea regada en C-XXV-3 (cuenca con un 26% de superficie sin regar ni cultivar) supondría 31 kg N/ha regada, valor muy lejano a los presentados en C-XIX-6 con 103 kg N/ha regada y C-XXX-3 con 199 kg N/ha regada y que presentan respectivamente el 5 y el 2% de la superficie sin regar ni cultivar.

Dado que la mayor parte del nitrógeno lavado proviene de los propios aportes realizados en la fertilización de los cultivos, se puede concluir que el 56% del nitrógeno aplicado por fertilización en C-XXX-3 se pierde por drenaje, frente al 44% en C-XIX-6 y tan sólo el 16% en C-XXV-3. Estos resultados ponen de manifiesto el inadecuado manejo del riego-fertilización ocasionando un exceso de dosis especialmente problemática en las cuencas con suelo de saso, que repercuten económicamente en los costes de producción.

Tabla 5.20. Fracción de drenaje (*FD*), fertilización nitrogenada en superficie cultivada (*F*), masa de nitrógeno exportada en el drenaje propio de las cuencas (*ND*), y volumen (*D*) y concentración de nitrato ([NO_3^-]) del agua de drenaje propio de las cuencas C-XIX-6, C-XXV-3 y C-XXX-3 durante el año hidrológico 2001.

Cuenca	*FD* (%)	*F* (Kg N/ha)	*ND* (Kg/ha)	*D* (mm)	[NO_3^-] (mg/L)
C-XIX-6	44,6	233	98	755	58
C-XXV-3	37,4	203	23	495	21
C-XXX-3	56,7	357	195	1113	77

La masa de nitrógeno exportada en el drenaje, estimada por Basso (1994) para todo el polígono de Bardenas I en 35,5 kg N/ha/año, es inferior a la masa exportada en C-XXX-3 y C-XIX-6 y superior a la de C-XXV-3, lo que se justifica por las proporciones de los distintos suelos en la CR-V y la reutilización del agua de drenaje para el riego aumentando la eficiencia del conjunto del sistema agrario y disminuyendo la masa de nitrógeno exportada.

La estimación de Basso (1994) para la masa de nitrógeno exportada en el drenaje de los colectores C-11 (132 kg N/ha/año) y C-13 (93 kg N/ha/año) drenantes de zonas de saso menos extensas, y por tanto con menor reutilización de agua, se aproxima a las estimaciones para C-XXX-3 y C-XIX-6.

Aragüés (1998) encontró en dos cuencas piloto de Monegros II con predominio del maíz, riego presurizado y manejo del fertirriego, valores de [NO_3^-] superiores a 100 mg/L y masas de nitrógeno exportadas de 18 (D-IX) y 49 (D-XI) kg/ha/año. Éstas últimas fueron condicionadas por los bajos volúmenes de drenaje.

En cambio Isidoro (1999), en el polígono de riego de La Violada, con predominio del maíz y riego por inundación (fracción de drenaje en torno al 50%), obtuvo [NO_3^-] medias anuales de 33 mg/L y masas de nitrógeno exportadas de 70 kg N/ha/año. La menor masa de nitrógeno exportada en La Violada respecto a las cuencas C-XIX-6 y C-XXX-3 se justifica por su mayor superficie (5.282 ha) y por la menor presencia de suelos de saso (Isidoro, 1999).

Los resultados obtenidos en las tres cuencas experimentales del presente estudio, junto a los obtenidos en otros trabajos (Bardenas I, Monegros I, y Monegros II), ponen de manifiesto que el manejo agronómico de la fertilización nitrogenada y el uso del riego son los factores claves para el control de la masa de nitrógeno exportada y de la calidad del agua de drenaje. El aporte de nitrógeno por fertilización según las necesidades de los cultivos unido a una alta eficiencia en el uso del riego provoca un menor lavado del nitrato presente en el suelo disminuyendo la masa de nitrógeno exportada en el agua de drenaje.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

5.4 CONCLUSIONES

- ✓ La realización de los balances de agua, sales y nitrógeno en las tres cuencas experimentales requirió del análisis previo del comportamiento hidrogeológico de las mismas. Dicho análisis indica que los flujos subterráneos entrantes fueron significativos, contribuyendo en un porcentaje importante al volumen de agua y masas de sales y nitrógeno exportados por estas cuencas. En consecuencia, los valores medidos en los desagües no son atribuibles únicamente a los flujos de retorno del riego, razón por la cual fue necesaria la realización de balances del suelo para estimar el volumen de agua y masas de sales y nitrógeno exportados por el regadío.
- ✓ El caudal de drenaje medido en las estaciones de control situadas a las salidas de los desagües de las tres cuencas fue 0,25 (XXX-3), 0,36 (XIX-6) y 0,47 (XXV-3) (valores medios del año hidrológico en L/s/ha de superficie total de cada cuenca). Estas diferencias se justifican fundamentalmente por los contrastes hidrogeológicos de las cuencas (entradas y salidas subterráneas de agua). Los caudales de drenaje siguieron pautas similares en las tres cuencas: (1) valores en la época de no riego (octubre a marzo) bajos y relativamente constantes, con aumentos puntuales por efecto de las lluvias y (2) valores en la época de riego (abril a septiembre) más elevados (en promedio, entre dos y cuatro veces superiores a los de no riego según cuencas) y variables como consecuencia del drenaje del riego y de vertidos directos puntuales de las colas de acequia a los desagües.
- ✓ La *CE* medida en las aguas de los tres desagües fue baja (media anual entre 0,54 y 1,05 dS/m según cuencas) debido a la baja *CE* del agua del Canal de Bardenas (0,32 dS/m) y a la presencia de sales, baja en los materiales terciarios y muy baja en los materiales cuaternarios presentes en estas cuencas. La *CE* media en la estación de riego fue, según cuencas, entre un 30% y un 7% inferior a la de no riego debido a procesos de dilución asociados a la ineficiencia del riego.
- ✓ Las masas de sales medidas en los desagües en el año hidrológico 2001 fueron similares en las cuencas C-XIX-6 y C-XXV-3 (en torno a 6,5 t/ha de superficie total de la cuenca), en contraste con el menor valor medido en la cuenca C-XXX-3 (2,6 t/ha). Esta diferencia fue debida a que los desagües de las dos primeras cuencas interceptan todas las salidas de agua, mientras que en la cuenca C-XXX-3 las salidas subterráneas no interceptadas por el desagüe son muy importantes, exportando una masa de sales adicional de 4,6 t/ha (valor estimado).
- ✓ La concentración de nitrato medida en las aguas de los desagües fue alta o muy alta (medias anuales de 48 (D-XXV-3), 74 (D-XXX-3) y 116 (D-XIX-6) mg/L). El valor medio en la estación de riego fue entre un 30% y un 15% inferior al de la estación de no riego en los desagües D-XIX-6 y D-XXX-3. Por el contrario, en el desagüe D-XXV-3 el valor en la estación de riego superó en un 24% al de no riego. El contraste entre esta cuenca y las dos anteriores se atribuyó a diferencias en los cultivos, en los suelos, en los sistemas y manejo del riego y en la fertilización nitrogenada (menor superficie de maíz, riego por aspersión, mayor eficiencia del riego y mayor fraccionamiento del N por fertirriego en la cuenca C-XXV-3).
- ✓ Las masas de nitrato medidas en los desagües en el año hidrológico 2001 fueron muy elevadas: 248 (D-XIX-6), 155 (D-XXV-3) y 118 (D-XXX-3) Kg $N\text{-}NO_3^-$/ha. En la cuenca C-XXX-3 las salidas subterráneas exportaron una masa de nitrato adicional de 171 Kg $N\text{-}NO_3^-$/ha. A pesar de que el caudal de drenaje medido en D-XXV-3 superó en un 30% al de D-XIX-6, la masa de $N\text{-}NO_3^-$ exportada fue casi un 40% inferior en D-XXV-3 debido a sus menores concentraciones de nitrato derivadas de las razones apuntadas en la conclusión anterior.
- ✓ La calidad del riego, calificada por la Eficiencia del Uso Consuntivo del Agua (*EUCA*) y por el Déficit Hídrico (*DH*), dependió fundamentalmente de las características de los suelos (profundidad y capacidad de retención de agua, *CRA*) y del sistema de riego. Los valores

más altos de *EUCA* (62%) y más bajos de *DH* (2%) se presentaron en los suelos de valle (elevada profundidad y *CRA*) regados por aspersión, mientras que los valores más bajos de *EUCA* (44%) y más elevados de *DH* (5%) se presentaron en los suelos de saso (baja profundidad y *CRA*) sin nivelar y regados por inundación. Los riegos por inundación aplicados sobre los sasos al inicio del período de riego fueron los menos eficientes y los que provocaron las mayores fracciones de drenaje (en torno al 60-70% en abril).

- ✓ Los regantes acomodaron los riegos en base a las necesidades de agua de los cultivos, las características de los suelos y los sistemas de riego implantados en sus parcelas. Por ello, los volúmenes de riego fueron máximos en C-XXX-3 (1.396 mm de riego; 100% de suelos de saso pobremente nivelados; riego por inundación; 81% de la superficie total de maíz y alfalfa), intermedios en C-XIX-6 (1.112 mm de riego; 67% de suelos de saso bien nivelados; riego por inundación; 93% de maíz y alfalfa) y más bajos en C-XXV-3 (670 mm de riego; 40% de suelos de saso; 39% de la superficie regada por aspersión; 48% de maíz y alfalfa).
- ✓ Los balances de agua del suelo realizados en las tres cuencas produjeron unas estimas de volumen de drenaje interno (*D*, mm) y de fracciones de drenaje (*FD*, %) directamente relacionados con los volúmenes de riego aplicados en cada cuenca: 1.113 mm y 57% en C-XXX-3, 756 mm y 45% en C-XIX-6 y 495 mm y 37% en C-XXV-3.
- ✓ Las masas de sales exportadas por los flujos de drenaje propio de las cuencas fueron moderadas y directamente relacionadas con las fracciones de drenaje, oscilando entre un máximo de 4,7 t/ha en C-XXX-3 y un mínimo de 3,4 t/ha en C-XXV-3 (estimas para el año hidrológico 2001). Los sólidos disueltos totales de los flujos de retorno del riego fueron moderados e inversamente relacionados con las fracciones de drenaje, oscilando entre un máximo de 693 mg/L en C-XXV-3 (cuenca con la menor *FD*) y un mínimo de 423 mg/L en C-XXX-3 (cuenca con la mayor *FD*) (estimas medias para el año hidrológico 2001). Estos resultados son coherentes en sistemas con pocas sales en el suelo en los que el efecto "evapo-concentración" predomina sobre el efecto "meteorización".
- ✓ Las masas de nitrato exportadas por los flujos de drenaje propio de las cuencas estuvieron directamente relacionadas con las fracciones de drenaje (*FD*) y los aportes de fertilizantes nitrogenados (*NF*). Así, la masa exportada fue muy elevada (195 Kg N-NO_3^-/ha) en C-XXX-3 (*FD*= 57%; *NF*= 357 Kg/ha), elevada (98 Kg N-NO_3^-/ha) en C-XIX-6 (*FD*= 45%; *NF*= 233 Kg/ha) y baja (23 Kg N-NO_3^-/ha) en C-XXV-3 (*FD* = 37%; *NF*= 203 Kg/ha). Las elevadas dosis de *NF* aplicadas al maíz (superiores a 400 Kg/ha en C-XXX-3 y C-XIX-6), y su bajo fraccionamiento son causas principales de estas elevadas pérdidas, equivalentes al 56% y al 44% del N aplicado en C-XXX-3 y C-XIX-6, respectivamente). Por el contrario, las pérdidas en C-XXV-3 fueron muy bajas (el 16% del N aplicado) debido a las menores dosis aplicadas al maíz (262 Kg/ha) y a su fraccionamiento por fertirriego.
- ✓ Las concentraciones de nitrato en los flujos de retorno del riego estuvieron directamente relacionadas con las fracciones de drenaje y con las dosis de fertilizantes nitrogenados, siendo muy elevadas en C-XXX-3 y C-XIX-6 (77 y 58 mg NO_3^-/L, respectivamente) y bajas (21 mg/L) en la cuenca C-XXV-3. Este resultado, contrario al obtenido con los sólidos disueltos totales que disminuían conforme mayores eran las fracciones de drenaje, es consecuencia del exceso de N presente en los suelos de estas cuencas.
- ✓ La mejora de la fertilización nitrogenada, ajustando las dosis y los momentos de aplicación a las necesidades de los cultivos o utilizando en caso necesario fertilizantes de liberación lenta o inhibidores de la nitrificación, disminuiría las cantidades de nitrato en el suelo. Por otro lado la mejora de la eficiencia del riego disminuiría los flujos de drenaje que provocan el lavado del nitrato fuera del alcance de las raíces de los cultivos. Ambas medidas contribuirían a un ahorro en abonos nitrogenados y agua y a una menor perdida de nitrógeno en los flujos de retorno del regadío.

- ✓ La reutilización de las aguas de drenaje para el riego es una alternativa de gran interés para la reducción de la masa de sales y nitrato exportada en las aguas de drenaje. En general, la concentración salina de las aguas de drenaje permite su uso para el riego y el nitrógeno que las plantas pudieran tomar del agua de drenaje evitaría su emisión hacia los sistemas receptores de los retornos del regadío. Los resultados obtenidos en las cuencas C-XXX-3 y C-XIX-6 (cuencas más representativas de la CR-V) muestran que el volumen de agua y masa de nitrógeno que contienen los flujos de drenaje (en torno al 50% de agua y nitrógeno aplicado) serían capaces de abastecer a otra superficie de las mismas características siempre y cuando se optimice su aplicación.

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

6. CONCLUSIONES

El clima en la Comunidad de Regantes nº V de Bardenas (CR-V) es del tipo xérico mediterráneo y se caracteriza por su elevada evapotranspiración potencial y su baja pluviometría (valores medios de 1.084 y 419 mm, respectivamente, para la serie de 30 años entre 1965 y 1994). Este acusado déficit hídrico requiere del riego durante la mayor parte del año para obtener producciones agrícolas aceptables.

Los suelos de cultivo más representados en la CR-V (60% sasos y 40% aluviales) no presentan problemas de salinidad y son adecuados para la agricultura de regadío. Los únicos problemas están relacionados con la elevada pedregosidad y la presencia de horizontes petrocálcicos que limitan la profundidad efectiva de los sasos y su capacidad de retención de agua.

En la CR-V se desarrollan niveles acuíferos cuaternarios (glacis y aluviales) alimentados por el riego y las lluvias que son drenados por los ríos Riguel y Arba hacia los que converge la red de desagües. Los glacis constituyen acuíferos permeables por porosidad intergranular de una sola capa, de carácter libre y colgado, y sin conexión hidráulica con otros acuíferos. Las formaciones aluviales constituyen acuíferos permeables por porosidad intergranular, de una sola capa y de carácter libre.

Los cultivos más extendidos en la CR-V durante el año 2000 fueron la alfalfa (31% de la superficie cultivada) y el maíz (29%). El pimiento y, en general, las hortalizas ocuparon superficies mucho más bajas (3%) pero importantes para el sostenimiento económico de las pequeñas explotaciones.

El sistema de riego más implantado en la CR-V es el de inundación con turnos aproximados de 13 días. La CR-V consumió en la campaña de riego (abril a septiembre) de 2000 un total de 175 hm^3. El consumo medio unitario fue muy elevado (en torno a los 1.100 mm), en particular en los sectores con mayor presencia de suelos de saso (valores de hasta 1.600 mm). Las mayores dosis de riego se dieron al pimiento (en torno a 1.800 mm), alfalfa (1.500 mm) y maíz (1.100 mm) y las menores al cereal de invierno (490 mm). Estas cifras indican, tal como se detallará más adelante, que el manejo ineficiente del riego en la CR-V es un problema relevante que debe analizarse en profundidad.

La fertilización nitrogenada más generalizada en la CR-V fue en forma de abonos sólidos inorgánicos y tan sólo el 4% de los agricultores encuestados utilizaron abonos líquidos (fundamentalmente N32 aplicado en riego por aspersión). El N se fraccionó generalmente en dos aplicaciones, la primera en sementera de los cultivos de verano (valores máximos de 380 t N/día en abril) y la segunda en cobertera del maíz (valores máximos de 750 t N/día en junio). Las mayores dosis de N se aplicaron al maíz (412 kg/ha) y pimiento (394 kg/ha). En general el N aplicado fue muy superior a las necesidades de los cultivos. Así, las dosis de N fueron un 60% (cereal de invierno), 52% (girasol) y 43% (maíz) superiores a las teóricamente extraídas por estos cultivos. Estas cifras muestran, como se analiza con detalle en páginas siguientes, que el manejo ineficiente del N en la CR-V constituye otro serio problema que requiere un análisis profundo.

El análisis efectuado en la CR-V indica que las aguas subterráneas presentaron una salinidad baja-moderada (CE_{media}= 0,90 dS/m) y una concentración de nitrato elevada ($[NO_3^-]_{media}$= 96 mg/L). El acuífero de Miraflores y el aluvial del Riguel presentaron valores mayores que el acuífero de Miralbueno ya que en éste último se produce un efecto de dilución derivado de su recarga por filtraciones del Canal de Bardenas, cuyas aguas tienen valores muy bajos de *CE* (0,3 dS/m) y $[NO_3^-]$ (< 2 mg/L).

Las aguas de la red de desagües presentaron unos valores inferiores (CE_{media}= 0,87 dS/m y $[NO_3^-]_{media}$= 55 mg/L) a los de las aguas subterráneas debido al efecto diluente de escorrentías superficiales menos concentradas. Estas aguas, y en particular las subterráneas, no deben utilizarse para consumo humano dado que frecuentemente superan el límite sanitario de $[NO_3^-]$ establecido en 50 mg/L.

La *CE* y [NO_3^-] de las aguas de la CR-V aumentaron en el sentido de los flujos hídricos (hacia el Sur) y en la época invernal (ausencia de riego). En consecuencia las aguas del río Riguel, principal colector del drenaje de la CR-V, mostraron un progresivo empeoramiento de su calidad a medida que discurrieron por el área agrícola de regadío, presentando valores mínimos de *CE* (0,45 dS/m) y [NO_3^-] (2 mg/L) al inicio de la zona regable y durante el período de riego, y valores máximos de *CE* (1,55 dS/m) y [NO_3^-] (50 mg/L) a la salida de la CR-V y en el período de no riego.

El manejo ineficiente del riego y su efecto diluente provocó que la *CE* y [NO_3^-] de las aguas de drenaje fueran menores en la estación de riego (0,77 dS/m y 43 mg/L) que en la de no riego (1,07 dS/m y 79 mg/L) del año hidrológico 2000. Asimismo, los riegos ineficientes provocaron mayores caudales circulantes por los cursos fluviales y mayores alturas del nivel freático de los acuíferos en los meses estivales de riego. Por ello, a pesar de que los mayores valores de *CE* y [NO_3^-] del Riguel a la salida de la CR-V se presentaron en invierno, las mayores masas exportadas de sales (máximos de 450 t/día) y nitrato (máximos de 18 t/ha) se alcanzaron en verano.

La clasificación Cluster de los desagües según su *CE* y [NO_3^-] agrupó a éstos en cuatro grupos de distintas características asociados a: (1) el glacis de Miralbueno (*CE* bajas y [NO_3^-] altas); (2) el glacis de Miraflores (altas *CE* y [NO_3^-]); (3) los valles con cultivos herbáceos y arroz (bajas *CE* y [NO_3^-]) y (4) los desagües que drenan cuencas con características de los otros tres grupos (*CE* y [NO_3^-] intermedias).

El caudal de los desagües D-XIX-6, D-XXV-3 y D-XXX-3 medido en las tres estaciones de control localizadas en las salidas de las respectivas cuencas experimentales (C-XIX-6, C-XXV-3 y C-XXX-3), siguió una misma pauta general a lo largo del año hidrológico: en la época de no riego se registraron caudales bajos y relativamente constantes, que aumentaron puntualmente por efecto de lluvias, y en la época de riego los caudales aumentaron entre dos y cuatro veces (según cuencas) y fueron más variables debido al drenaje del riego y a vertidos directos de las colas de acequia.

La *CE* de los tres desagües fue moderada o baja (medias del año hidrológico 2001 entre 0,5 y 1,0 dS/m según cuencas) debido a la baja *CE* de las aguas de riego y a la escasa presencia de sales en los sustratos terciario y cuaternario. Por el contrario, la concentración de nitrato en los tres desagües fue alta o muy alta (medias del año hidrológico 2001 de 116 mg/L en D-XIX-6, 74 mg/L en D-XXX-3 y 48 mg/L en D-XXV-3).

Los caudales de drenaje (medias del año hidrológico 2001 entre 34 y 68 L/s según cuencas) y las masas de sal (entre 2,6 y 6,5 t/ha/año según cuencas) y nitrato (entre 118 y 248 kg $N\text{-}NO_3^-$/ha/año según cuencas) exportadas por los desagües no son atribuibles únicamente a los flujos de retorno del riego (o drenaje interno de las cuencas), ya que dependieron asimismo de las características hidrogeológicas de las cuencas y, en particular, de la existencia de flujos subterráneos entrantes drenados por los desagües de las tres cuencas y de flujos subterráneos salientes no interceptados por el desagüe D-XXX-3. En consecuencia, el volumen de agua y las masas de sal y nitrato exportados por el regadío se estimaron a través del balance diario de agua en el suelo y del seguimiento de los acuíferos.

El mayor volumen de riego (1.400 mm/año) se alcanzó en la cuenca C-XXX-3 debido a la alta permeabilidad de sus suelos (100% de saso), al riego por inundación (100% de la superficie) y a la elevada proporción de maíz y alfalfa (81% de la superficie cultivada). En consecuencia, en esta cuenca se obtuvo la menor eficiencia del uso consuntivo del agua *EUCA* (44%) y la mayor fracción de drenaje *FD* (57%). Por el contrario, el menor volumen de riego (950 mm), la mayor *EUCA* (62%) y la menor *FD* (37%) se alcanzaron en la cuenca C-XXV-3 debido a la elevada proporción de suelos de valle (60% de la superficie), al riego por aspersión en el 39% de la superficie cultivada y a la menor superficie de maíz y alfalfa (48% de la superficie cultivada). Estos resultados ilustran claramente que (1) las características de los

suelos, (2) el sistema y manejo del riego y (3) las necesidades hídricas de los cultivos son las tres variables más importantes que determinan la calidad del riego y el volumen de sus flujos de retorno.

A pesar de los elevados volúmenes de drenaje (entre 1.113 y 495 mm según cuencas), la concentración (entre 423 y 693 mg/L según cuencas) y la masa de sales (entre 3,4 y 4,7 t/ha/año según cuencas) exportada por los flujos de retorno del riego en el año hidrológico 2001 fueron bajas o moderadas debido a la baja salinidad del agua de riego y de los suelos. Las masas (concentraciones) de sales evidencian una relación de proporcionalidad inversa con las fracciones de drenaje de cada cuenca.

Las pérdidas de N en los flujos de retorno del riego estuvieron directamente relacionadas con los cultivos y el manejo del riego y de los fertilizantes. Así, la cuenca C-XXX-3 [preponderante en maíz, con riegos muy ineficientes (*FD* = 57%) y con unas dosis de N excesivas (*NF* = 357 Kg/ha) y escasamente fraccionadas] exportó unas aguas de drenaje interno con concentración (77 mg/L) y masa de nitrato (195 Kg N-NO_3^-/ha/año) muy elevadas, la cuenca C-XIX-6 [preponderante en maíz y alfalfa, con riegos ineficientes (*FD*= 45%) y unas dosis de N más moderadas (*NF*= 233 Kg/ha)] exportó unas aguas con concentración (58 mg/L) y masa de nitrato (98 Kg N-NO_3^-/ha) elevadas, y la cuenca C-XXV-3 [con poca proporción de maíz, riegos más eficientes (*FD*= 37%), dosis de N moderadas *NF*= 203 Kg/ha) y uso del fertirriego (mayor fraccionamiento)] exportó unas aguas con concentración (21 mg/L) y masa de nitrato (23 Kg NO_3^--N/ha/año) bajas. Las mermas económicas derivadas del porcentaje del nitrógeno aplicado que se perdió en los flujos de retorno del riego de estas cuencas fueron extraordinariamente elevadas (56% del N aplicado) en C-XXX-3, muy elevadas (44% del N aplicado) en C-XIX-6 y bajas (16% del N aplicado) en C-XXV-3. Estos resultados indican claramente que el buen manejo combinado del riego y del N pueden reducir eficazmente la contaminación agraria inducida por la agricultura intensiva de regadío.

Consideraciones y recomendaciones finales

Los principales problemas diagnosticados en la Comunidad de Regantes nº V de Bardenas (CR-V) son el inadecuado manejo del riego y de la fertilización nitrogenada, especialmente en los suelos de saso regados por inundación. En consecuencia, se producen (1) consumos excesivos de agua de buena calidad regulada en el embalse de Yesa, (2) estreses hídricos moderados que disminuyen el rendimiento potencial de los cultivos, (3) importantes mermas económicas derivadas de las elevadas pérdidas de N en las aguas de drenaje y (4) afecciones ambientales negativas derivadas de los elevados flujos de retorno del riego con importantes contenidos en nitrato.

Todo ello permite concluir que la sostenibilidad del sistema agrario desarrollado en la CR-V depende de la ejecución de una serie de actuaciones capaces de incrementar la eficiencia del riego y de la fertilización nitrogenada.

La mejora en el manejo de los actuales sistemas de riego por inundación puede efectuarse (a) adecuando las infraestructuras de distribución del agua a las demandas hídricas de los cultivos (mantenimiento de la red de canales de riego, construcción de embalses de regulación interna, reducción de los turnos de riego, riego a la demanda, adecuación de los caudales de las acequias al tamaño de las parcelas, reducción de las pérdidas de cola de las acequias), (b) optimizando la aplicación en parcela del agua de riego (generalización de la nivelación láser de las parcelas, ajuste del tiempo de corte de agua, reducción de escorrentías superficiales) y (c) mejorando la gestión del riego (generalizando tarifas binómicas o estableciendo tarifas progresivas en función del consumo de agua, servicios de asesoramiento al regante).

El cambio a sistemas de riego presurizados es recomendable en suelos muy permeables y/o poco profundos donde las excesivas dosis de agua aplicada con el riego por inundación provocan de forma irremediable elevadas fracciones de drenaje. Los riegos presurizados

diseñados con pluviometrías inferiores a la infiltración estabilizada de estos suelos permitirían incrementar la uniformidad y eficiencia del riego. Sin embargo, los costes derivados de esta transformación y las pérdidas de agua por evaporación y arrastre del riego por aspersión (de hasta un 20% o superiores en presencia de vientos fuertes, Faci y Bercero, 1991) deben ser tenidas en cuenta, pues pueden constituir un freno a su implantación generalizada. El cambio a sistemas de riego localizado debe ser considerado especialmente para los cultivos hortícolas cuya rentabilidad podría aumentar considerablemente debido al control del estrés hídrico, sobre todo en los suelos de saso no nivelados en los que el coste de la nivelación podría incluso superar a los costes de transformación.

La mejora en el manejo de la fertilización nitrogenada exige ajustar las dosis de los fertilizantes y fraccionar las aplicaciones en función de las necesidades de los cultivos, sobre todo en el maíz y hortícolas. El aporte de nitrógeno a las alfalfas, que supone en torno al 11% del nitrógeno total aportado a la CR-V, puede reducirse drásticamente, ya que sus necesidades son mayoritariamente cubiertas por fijación simbiótica del N_2.

Es evidente que la optimización de la fertilización nitrogenada sólo es posible mediante la optimización de riego, especialmente en los suelos más permeables y poco profundos (sasos). Dado que el lavado de nitratos en estos suelos es incontrolable con el manejo y el tipo de fertilizantes actuales (formas uréicas, amoniacales y nítricas), es necesario modificar las pautas a través del uso de inhibidores de la nitrificación, abonos de liberación lenta y, preferentemente, la generalización del fertirriego (aplicación de fertilizantes en las acequias y a través de los sistemas de riego presurizados).

Dado que las lluvias de otoño e invierno pueden lavar el nitrógeno remanente en el suelo, en las áreas-fuente más contaminantes puede ser recomendable la implantación de cultivos de cobertera detrás del cosechado del maíz y su posterior enterrado en verde. Sin embargo, esta medida puede ser de difícil aplicación práctica ya que en los años húmedos la cosecha del maíz se retrasa considerablemente y en los años secos su efectividad es irrelevante.

La política de reutilización del agua de drenaje para el riego, puesta ya en marcha por la CR-V, puede y debe intensificarse dada la baja salinidad y el alto contenido en nitratos de estas aguas. Esta práctica (1) permitiría conservar agua de buena calidad en el embalse de Yesa, (2) aumentaría la eficiencia global del riego en la CR-V, (3) flexibilizaría los turnos de riego, (4) reduciría el estrés hídrico de los cultivos, (5) ahorraría fertilizantes nitrogenados (hasta un 30% de ahorro en maíz) y (6) reduciría considerablemente las masas de sales y, en particular, de nitratos exportadas por la CR-V.

La reutilización del agua de drenaje puede llevarse a cabo desde los propios desagües o mediante la extracción de agua de los acuíferos. El agua de los desagües puede ser aplicada directamente en parcela, introducida en la red de acequias, o almacenada en embalses internos. El agua de los acuíferos, que actúan como embalses de regulación interna, puede ser bombeada directamente a los sistemas de riego presurizados o puede ser interceptada mediante zanjas perpendiculares al flujo subterráneo e introducida en la red de riego.

Finalmente, el estudio realizado en el marco de esta tesis doctoral debería extenderse a todo el polígono de riego de Bardenas al objeto de efectuar un diagnóstico global del sistema y de prescribir prácticas de manejo integradoras encaminadas a optimizar la productividad agraria y minimizar la contaminación inducida por la agricultura intensiva de regadío.

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

7. BIBLIOGRAFÍA

Alberto, F., Navas, A., 1986. La participación de los yesos en la salinización de las aguas superficiales de la cuenca del Ebro. Contribución relativa de los iones $SO^{=}$ y Ca^{2+} a la salinidad. An. Aula Dei (1986), 18 (1-2): 19-29.

Albiac, J., Uku, S., Martinez, Y., 2001. La protección de la calidad del agua mediante la gestión del agua de riego. IV Congreso Nacional de Economía Agraria. Pamplona.

Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper nº 56. FAO. Roma (Italia). 300 pp.

Aragüés, R., Beltrán, A., 1997. Estudio de balance hídrico en el desagüe D-IX en Valfarta (Huesca) en la zona regable de Monegros II. Servicio de Investigación Agroalimentaria y Dirección General de Estructuras Agrarias, Gobierno de Aragón.

Alvarez, M., Cabrera, F., 1995. La calidad de las aguas continentales españolas, estado actual e investigación. Geoforma Ediciones.

Auqué, L., Gimeno, M., Gómez, J., Acero, P., Mandado, J., 2001. Caracteres geoquímicos generales y modelización geotermométrica del sistema geotermal de Les Escaldes (Andorra). III Congreso Ibérico de Geoquímica. Zaragoza.

Baker, E., 1999. Hidrogeología del Bajo Aragón zaragozano y sus humedales: El complejo lagunar de las saladas de Chiprana. Publicación nº 100 del Centro de Estudios Comarcales del Bajo Aragón-Caspe de la Institución Fernando el Católico (pp 243-343).

Baker, J., 1990. Agricultural chemical management practices to reduce loses due to drainage. American Journal of Industrial Medicine, 18: 477-483.

Basso, L., Machín, J., Pellicer, F., 1990. Masa de sales exportada por la red de drenaje de Bardenas I, Monegros I y Cinca a las aguas superficiales de la cuenca del Ebro. An. Aula Dei, 20 (1-2): 168-181.

Basso, L., 1994. Los retornos salinos del polígono de riego Bardenas I y su contribución a la salinización de los ríos Arba y Riguel. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, Facultad de Filosofía y Letras. Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio.

Berga, A., 1993. Relaciones clima-agua-suelo-subsuelo en Monegros II. Tesis doctoral, Universidad de Lérida, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo.

Betrán, J., Pérez, 1994. Respuesta del maíz al abonado: análisis plurianual de resultados. Información Técnica 8/94. Departamento de Agricultura. Gobierno de Aragón.

Bingham F., Davis, S., Shade, E., 1971. Water relations, salt balance, and nitrate leaching losses of a 960-acre citrus watershed. Soil Science, 112 (6): 410-418.

Boletín Oficial de Aragón, 1997. Zonas vulnerables y código de buenas prácticas agrarias de Aragón. (BOA del 11 de junio de 1997).

Boletín Oficial de Aragón, 2001. Programas de actuación de obligado cumplimiento en zonas vulnerables de Aragón. (BOA del 3 de enero de 2001).

Bower, C., Wilcox, L., 1969. Nitrate content of the upper rio Grande as influenced by nitrogen fertilization of adjacent irrigated lands. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 33: 971-973.

Cain, D., 1985. Quality of the Arkansas River and irrigation-return flows in the lower Arkansas River valley, Colorado. Water Resources Investigations Report, 84-4273, US Geological.

Causapé, J., Isidoro, D., Quílez, D., Aragüés, R., 2001. Influencia del regadío en la calidad del río Riguel. XIX Congreso Nacional de Riegos y Drenajes, Zaragoza.

Causapé, J., Quílez D., Aragüés R., 2002. Water and nitrogen management in the irrigation district nª V of Bardenas (Zaragoza, Spain) and environmental impact on water resources. VII Congress European Society Agronomy (ESA). Córdoba (Spain).

Causapé, J., 2002. Estudio de las aguas subterráneas en la Comunidad de Regantes nº V de Bardenas (Zaragoza). XX Congreso Nacional de Riegos y Drenajes (AERYD). Ciudad Real.

Causapé, J., Quílez D., Aragüés R., 2002. Análisis de cuencas experimentales agrarias en la Comunidad de Regantes nº V de Bardenas (Zaragoza). XX Congreso Nacional de Riegos y Drenajes (AERYD). Ciudad Real.

Confederación Hidrográfica del Ebro, 2001. Cartografía digital disponible en www.chebro.es.

Confederación Hidrográfica del Ebro, 2001. Datos básicos de la Confederación Hidrográfica del Ebro disponibles en www.cheebro.es.

Cuenca, R., 1989. Irrigation system design: An engineering aproach. Prenttice Hall Inc. Englewood Cliffs, NJ, USA. 552 pp.

Custodio, E., Llamas, M., 1983. Hidrología Subterránea. Ediciones Omega.

Dechmi, F., Playán, E., Faci, J.M., Bercero, A., 2000. Uniformidad de los sistemas de riego por aspersión en el polígono de la Loma de Quinto. XVIII Congreso Nacional de Riegos y Drenajes, Huelva.

DOCE, 1991. Protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura. nº L 375 de 31/12/1.991 P. 0001 – 0008.

Domínguez, A., 1997. Tratado de fertilización. Mundiprensa Madrid.

Donézar, M., Del Valle de Lersundi, J., 2001. Red de cuencas experimentales agrarias de Navarra. XIX Congreso Nacional de Riegos y Drenajes, Zaragoza.

El Din El Quosy, D., 1990. Drainage water monitoring in the Nile Delta. Proceedings 14 th International Congress on Irrigation and Drainage, R. J., Brasil. nº 1-B: 595-611.

European Environment Agency, 1999. Nutrients in European Ecosystems. Enviromental assessment report nº 4. EEA. Copenhague.

Faci, J.M., Aragüés, R., Alberto, F., Quílez, D., Machín, J., Arrúe, J., 1985. Water and salt balance in an irrigation area of the Ebro river basin (Spain). Irrigation Science, 6 (1): 29-37.

Faci, J.M., Bercero, A., 1991. Efecto del viento en la uniformidad y en las pérdidas por evaporación y arrastre en el riego por aspersión. Investigación Agraria. Producción y Protección Vegetal, Vol. 6 (2): 171-182.

García, M., 1996. Hidrogeología de zonas endorréicas en climas semiáridos. Aplicación a los Monegros (Zaragoza y Huesca). Publicaciones del Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón.

Geosoft, 1999. Winsev 5. Versión demostración disponible en www.geosoft.com

Golden Sofware, Inc., 1995. Surfer. www.goldensoftware.com

Harker, D.B., 1983. Characteristics, trends and surface water quality implications of the saline effluent. French R.H. Editor. pp 325-334.

Isidoro, D., 1999. Impacto del regadío sobre la calidad de las aguas del barranco de La Violada (Huesca): salinidad y nitratos. Tesis doctoral, Universidad de Lérida, Escuela Técnica

Superior de Ingeniería Agraria. Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo.

Isidoro, D., Causapé, J., Quílez, D., Aragüés, R., 2001. Calidad de las aguas de drenaje de la Comunidad de Regantes V del Canal de las Bardenas. XIX Congreso Nacional de Riegos. Zaragoza.

Isidoro, D., Quílez, D., Beltrán, A., Dechmi, F., Lecina, S., Causapé, J., Playán, E., Cavero, J., Martínez, A., Faci, J.M., Aragüés, R., 2001. ADOR: Una metodología para el análisis y mejora de zonas regables. La comunidad V de Bardenas como caso de estudio. XIX Congreso Nacional de Riegos. Zaragoza.

Instituto Tecnológico Geominero de España, 1985. Investigación de los recursos hidráulicos totales de la cuenca del Arba. ITGE, 1985.

Instituto Tecnológico Geominero de España, 1980. Cartografía geológica 1:50.000. Hojas de Sádaba (245), Luna (246), Fustiñana (283) y Ejea de los Caballeros (284).

Instituto Tecnológico Geominero de España. Cartografía geológica 1:200.000. Hojas de Tudela (22) y Zaragoza (32).

Jiménez, R., Lamo de Espinosa, J., 1998. Agricultura sostenible. Mundiprensa Madrid.

Kaddah, W., Rhoades, J., 1976. Salt and water balance in Imperial Valley, California. Soil Sci. Soc.Am.J., 40: 93-100.

Laplaza, J., 1998. Modernización de regadíos: Mejora de la gestión integral del agua de riego. Comunidad de Regantes nº V de Bardenas.

Lecina, S., Playán, E., Isidoro, D., Dechmi, F., Causapé, J., Fací, J.M., Laplaza, J.M., 2001. Evaluación de los riegos de la Comunidad de Regantes V del Canal de Bardenas. XIX Congreso Nacional de Riegos y Drenajes. Zaragoza.

Lima, O., Niwas, S., 2000. Estimation of hydraulic parameters of shaly sandstone aquifers from geoelectrical measurements. Journal of Hydrology, 235:12-26.

Machín, J., Navas, A., Webb, B., 1997. Impact of irrigation on the nitrate contamination of the surface waters in Bardenas, northeastern Spain. XV Assembly of the international Association of Hydrological Sciences (IAHS). Rabat.

Martínez, J., 1978. Drainage and reclamation of salt-affected soils in Bardenas area, Spain. International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI, Wageningen, 322 pp.

Martínez-Cob, A., Faci, J.M., Bercero, A., 1998. Evapotranspiración y necesidades de riego de los principales cultivos en las comarcas de Aragón. Instituto "Fernando el Católico" (C.S.I.C.).

Miller, W., Guitjens, J.C., Mahannah, C.N., Joung, H.M., 1978. Pollutant contributions from irrigation surface return flows. J. Environ. Qual., 7 (1): 35-40.

Ministerio de Medio Ambiente, 1998. Libro Blanco del Agua en España. Centro de Publicaciones. Secretaría General Técnica. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.

Orús, F., 1997. Aspectos socioeconómicos y agropecuarios. 1ª jornada técnica sobre el estiércol fluido porcino. Gobierno de Aragón. Informaciones Técnicas nº 31.

Orús, F., Quílez, D., Betrán, J., 2001. El código de buenas prácticas agrarias (I). Fertilización nitrogenada y contaminación por nitratos. Gobierno de Aragón. Informaciones Técnicas nº 93.

Oster, J.D., Rhoades, J.D., 1975. Calculated drainage water composition and salt burdens resulting from irrigation with river waters in the western United States. J. Environ. Qual., 4 (1):73-79.

Pacheco, J., 1985. Evaluación del contenido de nitratos del agua subterránea en una región rural al Norte de la Península de Yucatán. Maestría en Ingeniería Ambiental. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán (Méjico).

Pinilla, A., 1968. Estudio sedimentológico de la zona aragonesa de la cuenca terciaria del Ebro. Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza, Facultad de Ciencias, Sección de Geológicas.

Playán, E., 1994. Eficiencia en el aprovechamiento del agua por el regadío. IV Jornadas sobre la organización y el funcionamiento de los riegos en Aragón. Huesca.

Playán, E., Faci, J.M., Cavero, J., Dechmi, F., Lecina, S., 1999. Casos de estudio: ahorro de agua en los regadíos de Aragón. V Conferencia Internacional "Nuevas fuentes de suministro de agua". Valencia.

Porta, J., López, M., Roquedo, 1994. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Mundiprensa, Madrid.

Quílez, D., 1985. Descripción, análisis y aplicación de un modelo hidrosalino del sistema "flujos de retorno del riego". Tesis de licenciatura. Universidad de Zaragoza, Facultad de Ciencias, Sección de Físicas.

Quílez, D., Aragüés, R., Faci, J.M., 1987. Calibración, verificación y aplicación de un modelo conceptual hidrosalino del sistema "flujos de retorno de riego". Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetales, 2 (2): 165-182.

Quílez, D., 1998. La salinidad en las aguas superficiales de la cuenca del Ebro: análisis del impacto potencial del regadío de Monegros II. Tesis doctoral, Universidad de Lérida, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo.

Ramos, C., Ocio, J., 1993. La agricultura y la contaminación de las aguas por nitrato. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Hoja divulgadora nº 7/92 HD.

Ramos, C., 1996. El efecto de las prácticas agrarias en la contaminación de las aguas por nitrato. IV Congreso de la Sociedad Española de Ciencia del Suelo (SECS). Lérida, 1996.

Real Decreto 1.138/1990 de 14 de septiembre por el que se aprueba la reglamentación técnico-sanitaria para el abastecimiento y control de las aguas potables de consumo público. BOE núm. 226 de 20.11.1990: 27488-27497.

Rhoades, J., Bingham, F., Letey, J., Hoffman, G., Dredrick, A., Pinter, P., Reploge, J., 1989. Use of saline drainage water for irrigation: Imperial Valley Study. Agricultural Water Management, 16: 25-36.

Saad, J., 1999. Efecto de la dosis de abonado y el riego sobre el lavado de nitrato en cultivo de maíz. (1999). Tesis doctoral, Universidad de Lérida, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo.

Sahuquillo, A., 1993. Los objetivos de los planes hidrológicos. Las aguas subterráneas y el medio ambiente. Revista de Obras Públicas, nº 3.318. pp 17-22.

Soil Survey Laboratory. 1996. Methods Manual. The Soil Survey Analytical Continumm. Soil Survey Investigations Report Nº 42 Version 3.0. USDA, NRCS, NSSC. USA. 693 pp.

Tanji, K., Henderson, S., Gupta, M., Iqbal y QueK, A., 1975. Water and salt transfers in Sutter Basin, California. ASAE, 18 (1): 111-115.

Tedeschi, A., Beltrán, A., Aragüés, R., 2001. Irrigation management and hydrosalinity balance in a semi-arid area of the middle Ebro river basin (Spain). Agricultural Water Management, 49 (2001): 31-50.

Tester, D., Carey, M., 1985. Prediction of nitrate pollution in chalk groundwater derived potable supplies and the renovation of an affected source. Journal of the Institute of Water Pollution Control, 84(3): 366-379.

United States Geological Survey. USGS, 2002. Información programa NAWQA disponible en: http://water.usgs.gov/nawqa.

USSL, 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soil. US Salinity Laboratory. USDA. Agric. Handbook, nº 60, 160 pp.

Wahl, 2000. Winflume. USDA. www.usbr.gov/wrrl/winflume

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

8. ANEJOS

BIBLIOTECA VIRTUAL

8.1 ANEJO 1

Modelo de encuestas

PROPIETARIO:
ARRENDATARIO:
POLÍGONO: **NÚMERO PARCELA:**

CULTIVO: No forrajeros

Fecha de siembra | **Superficie sembrada** | **ha** | **Sector**

PURÍN

¿Ha aplicado purín al campo? **SÍ** **NO**

Fecha de aplicación	Cantidad aproximada (m^3/ha)

ESTIÉRCOL

¿Ha aplicado estiércol al campo? **SÍ** **NO**

Fecha de aplicación	Tipo de estiércol (ovino, gallinaza, etc.)	Cantidad (T/ha)

ABONADO

Fecha de aplicación (aproximada)	Tipo de abono (15-15-15, 8-24-8, ...)	Sólido o Líquido	Cantidad (kg/ha)

COSECHA

Fecha de cosecha

¿Qué rendimiento aproximado ha obtenido este año? **kg/ha (en seco)**

RESIDUOS DE COSECHA: ¿Qué ha hecho con los residuos de cosecha?

Quemar		Enterrar		Empacar		Otros		Especifique cual	

PROPIETARIO:
ARRENDATARIO:
POLÍGONO: **NÚMERO PARCELA:**

CULTIVO: Forrajeros

ALFALFA DE PRIMER AÑO

Fecha de siembra | **Superficie sembrada** | **ha** | **Sector**

Época y modo de siembra

Modo de siembra	Especifique
Por ejemplo: alfalfa sembrada sola en septiembre o alfalfa sembrada con cereal de invierno u otras	

Abonos empleados

Fecha de aplicación	Tipo de abono (8-15-15, boy-15…)	Cantidad (kg/ha)

ALFALFA DE SEGUNDO AÑO Y SIGUIENTES

Año de siembra | **Superficie sembrada** | **ha** | **Sector**

Abonos empleados

Fecha de aplicación	Tipo de abono (8-15-15, boy-15,…)	Cantidad (kg/ha)

CORTES:

Número de cortes

NºCorte	Fecha	Rendimiento seco (kg/ha)
1		
2		
3		
4		
5		
6		

BIBLIOTECA VIRTUAL
MIGUEL DE CERVANTES

8.2 ANEJO 2

Inventario de puntos de agua de interés

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	M-XXVIII-1
		Nº orden	1
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 646607	**Y** 4666746	**Cota** 340

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miralbueno	**Litología** gravas
Profundidad	**Diámetro**
Revestimiento	**Uso** sin uso

Otros datos: Manantial contacto glacis-terciario

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	M-XXIX-1
		Nº orden	2
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 647277	**Y** 4664946	**Cota** 330

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miralbueno	**Litología** gravas
Profundidad	**Diámetro**
Revestimiento	**Uso** ganadería ovina

Otros datos: Manantial contacto glacis-terciario

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	M-XXX-1
		Nº orden	3
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 650799	**Y** 4674021	**Cota** 405

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miralbueno	**Litología** gravas
Profundidad	**Diámetro**
Revestimiento	**Uso** sin uso

Otros datos: Manantial contacto glacis-terciario

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	M-XXX-2
		Nº orden	4
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 64802	**Y** 4670689	**Cota** 378

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miralbueno	**Litología** gravas
Profundidad	**Diámetro**
Revestimiento	**Uso** riego huerto

Otros datos: Manantial contacto glacis-terciario

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	M-XXXII-1
		Nº orden	5
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 648123	**Y** 4660266	**Cota** 293

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miralbueno	**Litología** gravas
Profundidad	**Diámetro**
Revestimiento	**Uso** de boca

Otros datos: Manantial contacto glacis-terciario
Acopio de agua por los habitantes de El Sabinar.

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XVIII-1
		Nº orden	6
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 638168	**Y** 4670505	**Cota** 353

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miraflores	**Litología** gravas
Profundidad 6,85 m	**Diámetro** 1,10 m.
Revestimiento Sí	**Uso** riego invernadero

Otros datos: Pozo con galería.

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XVIII-2
		Nº orden	7
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 637570	**Y** 4671893	**Cota** 360

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miraflores	**Litología** gravas
Profundidad 4,30 m	**Diámetro**1 m
Revestimiento Sí	**Uso** cementerio

Otros datos: Cementerio Pinsoro

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XVIII-3
		Nº orden	8
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 637769	**Y** 4673687	**Cota** 371

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miraflores	**Litología** gravas
Profundidad 3,50 m	**Diámetro** 1.2 m
Revestimiento Sí	**Uso** riego invernadero

Otros datos: Cercanía de numerosos manatiales

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XIX-1
		Nº orden	9
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 641772	**Y** 4667872	**Cota** 337
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miraflores		**Litología** gravas	
Profundidad		**Diámetro**	
Revestimiento		**Uso** riego invernadero	
Otros datos: Conectado mediante una galería al desagüe.			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXIV-1
		Nº orden	10
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 643185	**Y** 4674871	**Cota** 417
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miraflores		**Litología** gravas	
Profundidad 4,50 m		**Diámetro** 1 m	
Revestimiento No		**Uso** Sin uso	
Otros datos:			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXIV-2
		Nº orden	11
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 641263	**Y** 4674124	**Cota** 373
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero aluvial Riguel		**Litología** Arenas	
Profundidad 3,10 m		**Diámetro** 0,80 m	
Revestimiento Sí		**Uso** Sin uso	
Otros datos:			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXV-1
		Nº orden	12
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 643225	**Y** 4668461	**Cota** 336
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero aluvial Riguel		**Litología** Arenas	
Profundidad 5 m		**Diámetro** 1,7 m	
Revestimiento Sí		**Uso** agrícola	
Otros datos:			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXVI-1
		Nº orden	13
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 646526	**Y** 4670797	**Cota** 384

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miralbueno	**Litología** gravas
Profundidad 5 m	**Diámetro** 1 m
Revestimiento Sí	**Uso** riego aspersión

Otros datos:
Galería de 15 m en dirección Este-Oeste

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXVI-2
		Nº orden	14
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 646360	**Y** 4668839	**Cota** 362

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miralbueno	**Litología** gravas
Profundidad 3 m	**Diámetro** 1 m
Revestimiento Sí	**Uso** granja porcina

Otros datos: Situado a media ladera.

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXVI-3
		Nº orden	15
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 645731	**Y** 4676937	**Cota** 443

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miralbueno	**Litología** gravas
Profundidad 15 m	**Diámetro** 1,30 m
Revestimiento piedra	**Uso** sin uso

Otros datos: Confederación Hidrográfica del Ebro. Junto al Canal de Bardenas.

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXVII-1
		Nº orden	16
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 643893	**Y** 4663987	**Cota** 312

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miralbueno	**Litología** gravas
Profundidad 2,90 m	**Diámetro** 1 m
Revestimiento Sí	**Uso** varios

Otros datos:

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXVIII-1
		Nº orden	17
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 647452	**Y** 4667809	**Cota** 354

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miralbueno	**Litología** gravas
Profundidad 7 m	**Diámetro**
Revestimiento Sí	**Uso** granja porcina

Otros datos: Pozo con galería de 5 m orientada Norte-Sur por el mallacán.

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXVIII-2
		Nº orden	18
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 647483	**Y** 4667653	**Cota** 353

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miralbueno	**Litología** gravas
Profundidad 4 m	**Diámetro** 1,10 m
Revestimiento Sí	**Uso** varios

Otros datos:

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXVIII-3
		Nº orden	19
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 647852	**Y** 4666850	**Cota** 345

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miralbueno	**Litología** gravas
Profundidad 5 m	**Diámetro** 1,2 m
Revestimiento Sí	**Uso** granja porcina

Otros datos: Galería de 6 m.
Caudal estimado 2 L/s.

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXVIII-4
		Nº orden	20
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 648108	**Y** 4667961	**Cota** 353

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miralbueno	**Litología** gravas
Profundidad 4 m	**Diámetro** 1,5 m
Revestimiento No	**Uso** varios

Otros datos:

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXVIII-5
		Nº orden	21
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 647928	**Y** 4668949	**Cota** 361

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miralbueno	**Litología** gravas
Profundidad 5 m	**Diámetro** 1,20 m
Revestimiento Sí	**Uso** sin uso.

Otros datos:

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXVIII-6
		Nº orden	22
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 648185	**Y** 4672296	**Cota** 392

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miralbueno	**Litología** gravas
Profundidad 7 m	**Diámetro** 1,20 m
Revestimiento Sí	**Uso** riego aspersión

Otros datos: Agricultura ecológica.

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXVIII-7
		Nº orden	23
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 646848	**Y** 4673631	**Cota** 405

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miralbueno	**Litología** gravas
Profundidad 4 m	**Diámetro** 1 m
Revestimiento Sí	**Uso** varios

Otros datos: Anteriormente ganadería bovina. Seco en invierno.

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXIX-1
		Nº orden	24
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 646676	**Y** 4665428	**Cota** 335

Fotografía

Datos técnicos	
Acuífero Miralbueno	**Litología** gravas
Profundidad 5 m	**Diámetro** 1 m
Revestimiento Sí	**Uso** varios

Otros datos: Imposibilidad de medir piezometría.

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXIX-2
		Nº orden	25
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 646237	**Y** 4664510	**Cota** 327
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad 5 m		**Diámetro** 1 m	
Revestimiento Sí		**Uso** varios	
Otros datos:			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXIX-3
		Nº orden	26
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 646285	**Y** 4663193	**Cota** 316
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad 3 m		**Diámetro** 1 m	
Revestimiento Sí		**Uso** varios	
Otros datos:			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XIX-4
		Nº orden	27
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 645766	**Y** 4662213	**Cota** 302
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad 3,5 m		**Diámetro** 1,3 m	
Revestimiento Sí		**Uso** varios	
Otros datos:			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXIX-5
		Nº orden	28
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 647811	**Y** 4664767	**Cota** 331
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad 3,5 m		**Diámetro** 1 m	
Revestimiento Sí		**Uso** granja porcina	
Otros datos: Caudal 10.000 L/hora. Volumen 25.000L/día. Galería 20 m.			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXX-1
		Nº orden	29
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 648910	**Y** 4673047	**Cota** 398
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad 6 m		**Diámetro** 1 m	
Revestimiento Sí		**Uso** varios	
Otros datos:			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXX-2
		Nº orden	30
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 649163	**Y** 4673323	**Cota** 401
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad 7 m		**Diámetro** 1 m	
Revestimiento Sí		**Uso** granja porcina	
Otros datos:			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXX-3
		Nº orden	31
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 648880	**Y** 4675249	**Cota** 423
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad 7 m		**Diámetro** 1 m	
Revestimiento Sí		**Uso** riego aspersión	
Otros datos: Pozo con galería de 150 m. Galería Este-Oeste			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXX-4
		Nº orden	32
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 648978	**Y** 4675619	**Cota** 428
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad 6,10 m		**Diámetro** 1 m	
Revestimiento Sí		**Uso** granja porcina	
Otros datos: Volumen extraído 5.000 L/día			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXX-5
		Nº orden	33
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 648247	**Y** 4673290	**Cota** 404
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad 4,5 m		**Diámetro** 1 m	
Revestimiento Sí		**Uso** sin uso	
Otros datos:			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXX-6
		Nº orden	34
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 649493	**Y** 4671887	**Cota** 385
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad		**Diámetro** 1,20 m	
Revestimiento Sí		**Uso** Ganadería ovina	
Otros datos:			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXX-7
		Nº orden	35
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 647272	**Y** 4675368	**Cota** 425
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad		**Diámetro** 1,50 m	
Revestimiento No		**Uso** Sin uso	
Otros datos: Junta monte de Biota			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXX-8
		Nº orden	36
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 649528	**Y** 4676572	**Cota** 439
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad		**Diámetro** 2 m	
Revestimiento No		**Uso** Sin uso	
Otros datos: Junta monte de Biota			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXX-9
		Nº orden	37
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 649981	**Y** 4675535	**Cota** 426
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad 3,30 m		**Diámetro** 1 m	
Revestimiento Sí		**Uso** varios	
Otros datos:			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXX-10
		Nº orden	38
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 650277	**Y** 4675013	**Cota** 421
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad 7 m		**Diámetro** 1 m	
Revestimiento Sí		**Uso** granja porcina	
Otros datos: 15.000 L/día bombeados en una hora.			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXX-11
		Nº orden	39
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 650375	**Y** 4674649	**Cota** 415
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad 3,75 m		**Diámetro** 1 m	
Revestimiento Sí		**Uso** varios	
Otros datos:			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXX-12
		Nº orden	40
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 648488	**Y** 4674502	**Cota** 417
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad		**Diámetro**	
Revestimiento		**Uso** varios	
Otros datos:			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXX-13
		Nº orden	41
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 648715	**Y** 4672579	**Cota** 393
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad 5,5 m		**Diámetro** 1 m	
Revestimiento Sí		**Uso** granja porcina	
Otros datos: Pozo con galería en dirección Este-Oeste de 40 m de longitud.			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXX-14
		Nº orden	42
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 649505	**Y** 4674193	**Cota** 410
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad		**Diámetro**	
Revestimiento		**Uso** riego goteo	
Otros datos: Realmente es un pozo que recoge agua de un dren subterráneo			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXX-15
		Nº orden	43
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 650310	**Y** 4673123	**Cota** 396
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad 3 m		**Diámetro** 1 m	
Revestimiento Sí		**Uso** riego	
Otros datos:			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXXI-1
		Nº orden	44
Hoja topográfica 1: 50000		Sádaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 648802	**Y** 4670688	**Cota** 375
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad 3,5 m		**Diámetro** 0,90 m	
Revestimiento Sí		**Uso** varios	
Otros datos:			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXXI-2
		Nº orden	45
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 650875	**Y** 4668335	**Cota** 348
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad 3,90 m		**Diámetro** 1 m	
Revestimiento Sí		**Uso** varios	
Otros datos:			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXXII-1
		Nº orden	46
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 648945	**Y** 4661064	**Cota** 301
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad 3,25 m		**Diámetro** 1 m	
Revestimiento Sí		**Uso** ganadería ovina	
Otros datos:			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXXII-2
		Nº orden	47
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 649738	**Y** 4664321	**Cota** 324
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad 3 m		**Diámetro** 1,2 m	
Revestimiento Piedra		**Uso** sin uso	
Otros datos:			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-XXXII-3
		Nº orden	48
Hoja topográfica 1: 50000		Fustiñana 26-12 (283)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 649387	**Y** 4665036	**Cota** 331
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad 3,5 m		**Diámetro** 1 m	
Revestimiento Piedra		**Uso** sin uso	
Otros datos: Ayuntamiento de Ejea.			

Inventario de puntos de interés			
Registro y situación		**Registro**	P-BIOTA-1
		Nº orden	49
Hoja topográfica 1: 50000		Sadaba 26-11 (245)	
Coord. UTM 30TXM	**X** 647619	**Y** 4677136	**Cota** 448
Fotografía			
Datos técnicos			
Acuífero Miralbueno		**Litología** gravas	
Profundidad		**Diámetro** 2 m	
Revestimiento No		**Uso** sin uso	
Otros datos: Junta monte de Biota			

BIBLIOTECA VIRTUAL MIGUEL DE CERVANTES

RESUMEN

La agricultura de regadío influye positivamente en el desarrollo económico y social pero puede provocar afecciones medioambientales negativas tales como la salinización y contaminación por nitratos de los ríos y acuíferos receptores de los retornos del riego. Al objeto de identificar los principales problemas medioambientales inducidos por el riego en la Comunidad de Regantes nº V de Bardenas (España), se realizó un seguimiento del sistema agrario (geología, clima, y agronomía) así como de sus aguas superficiales (oct-99/sept-00) y subterráneas (jul-00/sept-01), y se efectuó un análisis detallado de tres cuencas hidrológicas midiendo o estimando las principales entradas y salidas de agua, sales y nitrógeno (oct-00/sept-01).

Los resultados mostraron una moderada salinidad (generalmente CE inferior a 1 dS/m) y un alto contenido en nitrato (frecuentemente valores superiores a 50 mg/L) de las aguas superficiales y subterráneas. Las concentraciones de sales y nitrato aumentaron según el sentido de los flujos hídricos y en invierno (ausencia de riego). El manejo del riego y de la fertilización en relación con las características edáficas de las cuencas experimentales condicionaron la concentración y carga de contaminantes exportados. Así, hasta un 56% del N aplicado en la cuenca con suelos muy permeables y mayores dosis de riego (1400 mm) y fertilizante (357 Kg N/ha) se perdió por el drenaje. Las pérdidas disminuyeron hasta el 16% del N aplicado en la cuenca con suelos de mayor capacidad de retención de agua, mayor eficiencia y uniformidad del riego (dosis de 950 mm), y menores dosis (203 Kg N/ha) y mayor fraccionamiento del nitrógeno aplicado (fertirriego).

ABSTRACT

Irrigated agriculture has a positive influence on economic and social developments, but it may have negative impacts on the environment such as the salinization and nitrate pollution of rivers and aquifers receiving the return flows from irrigation. With the aim of identifying the main environmental problems induced by irrigated agriculture in the Irrigation Community nº V of Bardenas (Spain), a study was made on the (1) agricultural system (geology, climate and agronomy), (2) surface (Oct-99/Sept-00) and groundwaters (Jul-00/Sept-01) and (3) main inputs and outputs of water, salt and nitrogen in three hydrological basins (Oct-00/Sept-01).

The results show that surface and groundwaters were moderate in salinity (EC values generally lower than 1 dS/m) and high in nitrate content (values frequently greater than 50 mg/L). Salt and nitrate concentrations increased along the direction of the flows of water as well as in winter (i.e., lack of irrigation). Concentrations and loads of contaminants exported in drainage waters depended on irrigation and fertilization managements. Thus, up to 56% of the applied N was lost in the basin with high-permeable soils and greater irrigation (1400 mm) and fertilization (357 Kg N/ha) doses. On the other hand, only 16% of the applied N was lost in the basin with soils of higher water holding capacity, greater efficiency and uniformity of irrigation (i.e., 950 mm of irrigation water), lower fertilization doses (203 Kg N/ha) and greater splitting of N applied (fertigation).