

Raúl Andrés Mateo

Estudio del riego por aspersión en LASESA (Monegros, Huesca)

Departamento
Ciencias Agrarias y del Medio Natural

Director/es
Cuchi Oterino, José Antonio

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>



Universidad
Zaragoza

Tesis Doctoral

ESTUDIO DEL RIEGO POR ASPERSIÓN EN LASESA (MONEGROS, HUESCA)

Autor

Raúl Andrés Mateo

Director/es

Cuchi Oterino, José Antonio

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Ciencias Agrarias y del Medio Natural

2013



TESIS DOCTORAL

Estudio del riego por aspersión en LASESA (Monegros, Huesca)

Autor: **Raúl Andrés Mateo**

Dirigida por: **Dr. José Antonio Cuchí Oterino**

Universidad de Zaragoza

Departamento de Ciencias Agrarias y del
Medio Natural

2013



**Departamento de
Ciencias Agrarias
y del Medio Natural
Universidad Zaragoza**

Tesis doctoral

**Estudio del riego por aspersión
en LASESA (Monegros, Huesca)**

Autor: Raúl Andrés Mateo

Dirigida por: Dr. José Antonio Cuchí Oterino

Programa: Ciencias Agrarias y del Medio Natural

2013

A mis chicas Maria, Candela y Siena
y a mi amigo Cesar Ballester Pinilla

Agradecimientos

En la elaboración de esta tesis he recibido ayuda desinteresada de varias personas a las que quiero agradecer sinceramente su forma de ser, porque con ello han facilitado este trabajo.

Agradezco a mi director José Antonio Cuchí por todo lo que me ha enseñado.

A mi mujer Maria, mi amigo Eduardo y demás revisores por su dedicación. A Mar Armesto, Paula Pérez, Lourdes Royes, Rodrigo Mur, Jorge Palacio, mi padre y mi suegro por acompañarme en los muestreos y análisis de laboratorio.

A Humberto Piquer (encargado de HORMISA) sin cuya ayuda desinteresada no se habría construido el aforador en el barranco de Malfarás.

A la comunidad de regantes de Lastanosa, Sena y Sariñena (LASESA), sus presidentes Jesús Guillén y Florencio Ardanuy y secretario José Antonio Dolader, por proporcionar los datos de riego, básicos para este estudio. Quiero agradecer especialmente la disposición de los agricultores encuestados y de los que permitieron hacer calicatas y ensayos en sus campos: Fernando Regaño, Alberto Carilla, Sergio Mas, Alberto Uriol, Andrés Ladrero...

A Luis Javier Cruchaga por facilitarme la base cartográfica. A José Manuel Bienzobas de la Dirección General de la Producción Agraria de la Diputación General de Aragón por proporcionar los datos de superficies de cultivo.

A mis compañeros de trabajo. David Badía y Clara Martí por la descripción de perfiles y determinación del agua útil del suelo. José Antonio Manso por la analítica de cationes. Jesús Betrán por la determinación de texturas. Ernesto Pérez, Asunción Usón, Javier García y Cesar González por su ayuda y consejos.

A la Universidad de Zaragoza por el contrato de profesor ayudante que me ha permitido hacer esta tesis. Al Instituto de Estudios Altoaragoneses por la ayuda a la investigación y a la Diputación Provincial de Huesca por la beca de investigación del Premio Félix de Azara.

Al Dr. Mariano Gracia Ortubia del Laboratorio Municipal de Salud del Ayuntamiento de Zaragoza por la cuidadosa analítica de muestras de agua.

Resumen

El riego es esencial para la producción agrícola en las zonas semiáridas, pero también es un importante consumidor y contaminador de agua. Para minimizar el conflicto entre regadío y conservación de agua es necesario llevar a cabo estudios detallados en casos reales para mejorar la eficiencia del uso del agua y nitrógeno.

Este trabajo analiza la relación entre la gestión del regadío por aspersión y la contaminación del agua en la comunidad de regantes de LASESA. La metodología se basó en caracterizar los factores que intervienen en el ciclo del agua y sus interacciones. También se determinó la fertilización nitrogenada y la calidad del agua. Con estos datos, se desarrollaron balances de agua, sales y nitrógeno en las principales cuencas que drenan LASESA (9.980 ha, Sariñena Huesca) durante las campañas agrícolas del 2009 y 2010.

Los resultados muestran que las cuencas devuelven a la atmósfera el 81% de la entrada total de agua, de los que sólo el 63% es la evapotranspiración de los cultivos. La fracción de drenaje es del 18% equivalente a 163 mm. Anualmente se exporta una media de 1.538 kg de sales y 43 kg de nitrógeno por hectárea.

Las propiedades hídricas de cada cuenca determinan la evolución del caudal y concentración de nitratos en el agua drenada. Así en las cuencas con suelos desarrollados sobre terrazas y laderas, la fracción de drenaje y concentración de nitrato son, 22% y 120 mg L⁻¹ respectivamente, con lo que la masa anual de nitrógeno exportado asciende a 64 kg ha⁻¹. En las de suelos desarrollados sobre Terciario y los rellenos de vales, los menores valores de fracción de drenaje y concentración de nitrato (9% y 90 mg L⁻¹) hacen que la masa anual de nitrógeno exportado sea unas cinco veces menor (12 kg ha⁻¹).

El exceso de riego y fertilización en maíz, hacen que este cultivo sea la principal fuente de contaminación por nitrógeno. En los últimos años ha descendido esta fertilización. Sin embargo, el 26% del nitrógeno aplicado como fertilización mineral y orgánica, sigue perdiéndose en el agua de drenaje. Esta pérdida de nitrógeno está relacionada con la eficiencia del actual riego por aspersión, que es del 76%. Para mejorarla se simula un sencillo cambio en la programación del riego con el que se alcanzaría el 83%. Además, las pérdidas por drenaje se reducirían en un 8% lo que permitiría disminuir la masa de nitrógeno exportado en un 15%.

Índice general

1	INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1	EL PROBLEMA DE LA ALIMENTACIÓN MUNDIAL	3
1.2	REGADÍO Y AGUA DISPONIBLE.....	3
1.3	REGADÍO Y MEDIO AMBIENTE	5
1.4	EVALUACIÓN DEL RIEGO	6
1.5	LASESA COMO ZONA DE ESTUDIO	7
2	OBJETIVOS.....	9
3	DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	13
3.1	LOCALIZACIÓN.....	15
3.2	GEOLOGÍA.....	17
3.2.1	<i>Historia geológica</i>	17
3.2.2	<i>Geomorfología</i>	19
3.2.3	<i>Litología</i>	19
3.3	HIDROLOGÍA	21
3.4	CLIMATOLOGÍA.....	23
3.4.1	<i>Temperaturas</i>	24
3.4.2	<i>Precipitaciones</i>	25
3.4.3	<i>Humedad relativa</i>	25
3.4.4	<i>Viento</i>	25
3.4.5	<i>Evapotranspiración</i>	26
3.5	CULTIVOS	26
3.5.1	<i>Maíz</i>	28
3.5.2	<i>Alfalfa</i>	29
3.5.3	<i>Cebada</i>	29
3.5.4	<i>Guisante</i>	30
3.5.5	<i>Otros cultivos</i>	30
3.6	GANADERÍA	31
4	SUELO Y AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	33
4.1	SUELO	35
4.1.1	<i>Introducción</i>	35
4.1.2	<i>Metodología</i>	36
4.1.2.1	Identificación de unidades.....	36
4.1.2.2	Medición de la infiltración del agua en el suelo	38
4.1.2.3	Apertura de calicatas y descripción de perfiles	39
4.1.2.4	Análisis químicos y físicos del suelo.....	39
4.1.3	<i>Resultados y discusión</i>	40
4.1.3.1	Infiltración.....	41
4.1.3.2	Propiedades morfológicas del suelo	47
4.1.3.3	Resultados analíticos	48
4.1.3.4	Subgrupos de suelos	55
4.2	AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	60
4.2.1	<i>Introducción</i>	60
4.2.2	<i>Metodología</i>	61
4.2.2.1	Inventario de puntos de agua y medición de nivel.....	61
4.2.2.2	Delimitación de capas en el subsuelo mediante sondeos eléctricos verticales.....	62
4.2.2.3	Porosidad y coeficiente de almacenamiento específico.....	63
4.2.2.4	Conductividad hidráulica	63
4.2.3	<i>Resultados y discusión</i>	65
4.2.3.1	Evolución del nivel freático	65
4.2.3.2	Porosidad y coeficiente de almacenamiento específico.....	67
4.2.3.3	Delimitación de capas en el subsuelo mediante sondeos eléctricos verticales.....	67
4.2.3.4	Conductividad hidráulica	70
4.2.3.5	Modelo de flujo de agua subterránea.....	73
4.3	CONCLUSIONES	75

5	MANEJO DEL RIEGO.....	77
5.1	INTRODUCCIÓN	79
5.2	METODOLOGÍA.....	80
5.2.1	<i>Descripción de la comunidad de regantes.....</i>	<i>80</i>
5.2.2	<i>Recolección y procesado de datos.....</i>	<i>81</i>
5.2.3	<i>Programación del riego.....</i>	<i>82</i>
5.2.4	<i>Balance de agua en el suelo</i>	<i>82</i>
5.2.5	<i>Calidad del riego.....</i>	<i>85</i>
5.3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	87
5.3.1	<i>Programación de riego actual.....</i>	<i>87</i>
5.3.2	<i>Calidad del riego actual.....</i>	<i>90</i>
5.3.3	<i>Propuesta de cambio en la programación de riego.....</i>	<i>97</i>
5.3.4	<i>Calidad del riego de la nueva de programación.....</i>	<i>100</i>
5.4	CONCLUSIONES	104
6	BALANCE HIDROLÓGICO.....	107
6.1	INTRODUCCIÓN	109
6.2	METODOLOGÍA.....	110
6.2.1	<i>Delimitación de cuencas.....</i>	<i>110</i>
6.2.2	<i>Balance hidrológico de las cuencas</i>	<i>110</i>
6.2.3	<i>Índices de uso de agua.....</i>	<i>113</i>
6.3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	114
6.3.1	<i>Delimitación de cuencas.....</i>	<i>114</i>
6.3.2	<i>Agua aforada por cuencas de drenaje.....</i>	<i>117</i>
6.3.3	<i>Balance hidrológico por cuencas</i>	<i>121</i>
6.3.4	<i>Índices de uso de agua.....</i>	<i>127</i>
6.3.5	<i>Balance agregado por cultivos.....</i>	<i>129</i>
6.4	CONCLUSIONES	131
7	BALANCE DE SALES Y NITRÓGENO	133
7.1	INTRODUCCIÓN	135
7.2	METODOLOGÍA.....	136
7.2.1	<i>Análisis de agua</i>	<i>136</i>
7.2.2	<i>Balance de sales</i>	<i>137</i>
7.2.3	<i>Balance de nitrógeno.....</i>	<i>137</i>
7.3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	139
7.3.1	<i>Calidad química del agua.....</i>	<i>139</i>
7.3.2	<i>Balance de sales</i>	<i>147</i>
7.3.3	<i>Balance de nitrógeno.....</i>	<i>149</i>
7.4	CONCLUSIONES	157
8	CONCLUSIONES GENERALES.....	159
9	BIBLIOGRAFÍA	165
10	ÍNDICES DE FIGURAS Y CUADROS.....	181
	ÍNDICE DE FIGURAS.....	183
	ÍNDICE DE CUADROS	185
11	ANEJO DE DESCRIPCIÓN DE LOS PERFILES DE SUELO.....	187

1 Introducción general

INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1 El problema de la alimentación mundial

La constante mejora del bienestar material de las personas amenaza con sobrepasar los límites materiales del planeta, a menos que haya un cambio radical hacia patrones de consumo y producción sostenibles en relación al uso de los recursos naturales. Para el año 2050, se estima que la población mundial podría superar los 9.000 millones de personas, un 34 % superior a la de hoy en día (ONU, 2012). La práctica totalidad de este incremento tendrá lugar en los países en vías de desarrollo. Esto supondrá una mayor demanda de alimentos, a obtener primordialmente por la intensificación de la producción agrícola y en menor medida por ampliación de su superficie cultivada (FAO, 2009).

Actualmente se cultivan 1.530 millones de hectáreas, el 12% de la superficie terrestre (FAOSTAT, 2011). Se estima que existen sin cultivar otras 1.400 millones, con buen potencial agrícola, que se encuentran concentrada en unos pocos países (GAEZ, 2011). Sin embargo, la previsión es que la superficie cultivada se incremente sólo en un 5%. En los países desarrollados, la práctica totalidad de la tierra apta para la agricultura ya está en cultivo y sólo la intensificación permitirá aumentar la producción. En el caso de la Unión Europea se espera que este aumento de la producción sea tan sólo del 11% para el 2050, debido a su nulo crecimiento demográfico y a su elevado consumo actual de alimentos (Bruinsma, 2012).

1.2 Regadío y agua disponible

El regadío representa una forma de intensificar la producción agrícola mediante la aplicación de agua. La mayor productividad del regadío se constata porque genera el 44% de la producción agrícola mundial en tan sólo el 16% de la superficie cultivable. Sin embargo utiliza el 70% del agua consumida a nivel mundial (Alexandratos y Bruinsma, 2012). En cualquier caso, en las zonas áridas y semiáridas la agricultura de regadío es imprescindible para obtener las producciones necesarias.

El agua dulce es un recurso escaso cuya demanda crece de manera imparable (WRG, 2009). En las zonas áridas y semiáridas el problema de la escasez de agua aún es

más acuciante y en los casos extremos exigen la difícil labor de priorizar los usos más útiles para la sociedad. Además, los mercados financieros la han convertido en un activo económico más. Un ejemplo de esto son las recientes inversiones estratégicas en Etiopía y Sudán por parte de multinacionales agroalimentarias, fondos de inversión y Gobiernos extranjeros. Es evidente que una especulación sobre el recurso agua, un recurso vital para el ser humano, supone una fuente de conflictos.

Es conocido que España tiene una general escasez de lluvias, con la excepción de su franja norte. Por lo tanto, el regadío ha jugado un papel fundamental en la producción agrícola. En la época romana se construyeron las primeras infraestructuras de riego que la sociedad musulmana aprovechó y amplió. A partir del siglo XVI se hicieron obras hidráulicas, con técnicas propias de su época que limitaron la expansión de los riegos a las riberas de los ríos. A finales del siglo XIX, figuras como Joaquín Costa, reclaman obras hidráulicas para mitigar la carencia de alimentos. A principios del siglo XX se redactan los proyectos y se inician las obras de los grandes sistemas de riego (Aragón y Cataluña, Delta del Ebro, Riegos del Alto Aragón, Bajo Guadalquivir, Bardenas). A partir de los años 70 se introducen las técnicas de riego por aspersión provenientes de Estados Unidos y el riego por goteo, desarrollado en Israel.

Actualmente España cuenta con 3,5 millones de hectáreas de regadío, que suponen el 20% del territorio cultivado. El crecimiento de la superficie de regadío fue máximo en la década de 1970. Posteriormente el desarrollo se ralentizó y para el futuro se prevé una expansión mucho más modesta debido a los elevados costos de inversión, la escasez de zonas adecuadas, la limitación de recursos hídricos y cuestiones medioambientales. El 22% del regadío nacional se encuentra en la cuenca del Ebro, donde el riego utiliza el 80% del agua captada en un entorno semiárido, donde coexisten regadíos muy antiguos, incluso romanos con transformaciones muy recientes. Los sistemas más recientes y de mayor extensión se localizan en la margen izquierda (Bardenas, Riegos del Alto Aragón, Aragón y Cataluña, Urgel, Segarra y Garrigues). Proyectados a principios del siglo XX, tienen características y problemas similares. Las zonas desarrolladas en la primera mitad del siglo XX son de riego por superficie, con redes de distribución de pequeñas dimensiones y una gran parcelación. Las más recientes se han desarrollado por riego por aspersión, sobre un parcelario más concentrado.

Una parte importante del regadío español, 71%, tiene más de 25 años y en muchos casos con infraestructuras obsoletas incapaces de dar respuesta a la agricultura actual. Por ello, durante los últimos nueve años se han modernizado aproximadamente dos millones de hectáreas (Lecina et al., 2009). La mayor parte de los trabajos de modernización han consistido en el cambio del sistema de distribución de agua, de riego por gravedad a riego por aspersión. Las razones para este cambio son variadas, incluyendo aumentos en la eficacia y uniformidad del riego hasta disminuir los penosos trabajos nocturnos de riego. Sin embargo, no se han llegado a iniciar todas las modernizaciones previstas debido a la presente crisis económica, las dificultades de obtención de crédito, la incertidumbre y volatilidad de los precios así como la baja rentabilidad económica de algunos cultivos.

1.3 Regadío y medio ambiente

Es evidente que el riego tiene problemas ambientales. La transformación a regadío supone una modificación importante del ciclo hidrológico en los ambientes semiáridos (Baldock et al., 2000; Schoups et al., 2005; Liu et al., 2010). Existen casos de problemas de elevación o formación de capas freáticas asociados a este cambio en muchas de las zonas de regadío del planeta (Cuchí, 1989; Pulido, 1994; Singh, 2005). Otro problema derivado del riego son las aguas de drenaje con las que se exportan diversas sales naturales, abono y otros fitoquímicos. La excesiva presencia del ion nitrato es causa de problemas en el medio natural (Ongley, 1996; Goolsby y Battaglin, 2001; Tanji y Kielen, 2002; Zalidis et al., 2002; Donner et al., 2004; Ribbe et al., 2008; Stamatis et al., 2011). En la cuenca del Ebro se han realizado diversos estudios sobre el tema, algunos proponen medidas preventivas, como la mejora en la eficiencia del riego y abonado para disminuir la contaminación actual (Faci et al., 1985; Mariño, 1986; Isidoro, 1999; Tedeschi et al., 2001; Causapé, 2002; Cavero et al., 2003; Causapé et al., 2004b; Isidoro et al., 2006a y 2006b; Causapé, 2009c; Balcells et al., 2010; Barros, 2010; García-Garizábal, 2010; Abrahão, 2010; Abrahão et al., 2011b; CHE, 2011; Barros et al., 2012a y 2012b; Cavero et al., 2012). Otros estudios proponen medidas correctoras, como los humedales artificiales (Comín et al., 1997; Romero et al., 1999; Moreno-Mateos et al., 2007, 2008, 2010; Moreno-Mateos y Comín, 2010)

1.4 Evaluación del riego

Una forma de afrontar estos problemas es la adopción de técnicas en las que la utilización de insumos pueda sustituirse por aportaciones de conocimiento, para hacer más ambientalmente sostenible a la agricultura de regadío (Bruinsma, 2012). Por tanto, la evaluación de riego, tanto en la gestión del agua como en exportación de sales y nutrientes, es una herramienta fundamental. Actualmente los regadíos por aspersión ofrecen diversas posibilidades de manejo, controlando el volumen de agua aplicada y modificando la programación de riego. Se han realizado diversos estudios en regadíos por aspersión del valle del Ebro (Tedeschi et al., 2001; Caverro et al., 2003; Dechmi et al., 2003; Ruiz et al., 2008; Mur, 2009; Abrahão et al., 2011a; Salvador et al., 2011a; Skhiri y Dechmi, 2012). Uno de los objetivos de estos estudios se dirige a optimizar su programación (Cancela et al., 2006; Lorite et al., 2007; Chopart et al., 2007; Zapata et al., 2009; Liyuan et al., 2010). Es evidente que para alcanzar la máxima eficiencia del riego por aspersión, a nivel de parcela, es necesaria una correcta programación (Tanji y Kielen, 2002). La información sobre las necesidades hídricas de los cultivos, sistema de riego y tipo de suelo permiten hacer una programación del riego óptima, en teoría. En la realidad, esta programación está sometida básicamente al criterio del regante, que se ha demostrado insuficiente (Salvador, 2011b). En cualquier caso, para realizar una optimización es necesario avanzar en el conocimiento de las propiedades hídricas del suelo, como herramienta indispensable para mejorar el riego, ya que la mayoría de las transformaciones en riego de las últimas décadas en el Ebro, no tuvieron en cuenta las características del suelo (Herrero, 1999).

Elemento fundamental de la gestión del riego es la realización de balances de agua, sales y nitrógeno, metodología aplicada por primera vez por Scofield (1940). Se puede trabajar a diversas escalas, siendo muy habitual trabajar a escala de cuenca hidrológica. Para el balance es necesario conocer, con la mayor precisión posible, todos los flujos de entrada y salida a partir de los cultivos, los parámetros hídricos del suelo, la gestión del agua de riego y los retornos de drenaje. Con un buen balance de agua se pueden obtener conclusiones adecuadas sobre las posibilidades de ahorro, sobre los efluentes derivados de sales naturales y del transporte de agroquímicos como fertilizantes o pesticidas.

La gestión de las grandes zonas agrícolas de regadío puede evaluarse mediante la realización de un balance de masas de sales y nitrógeno (Kaddah y Rhoades, 1976; Palacios et al., 1978; Faci et al., 1985; David et al., 1997; Isidoro, 1999; Tedeschi et al., 2001; Causapé, 2002; Caverro et al., 2003.; Causapé et al., 2004b; Schoups et al., 2005;

Isidoro et al., 2006a y 2006b; Causapé, 2009c; García-Garizábal et al., 2009; Abrahão, 2010; Balcells et al., 2010; Abrahão et al., 2011b; Chen et al., 2011; CHE, 2011; Noory et al., 2011; Barros et al., 2012a y 2012b; Caverro et al., 2012). Este método sirve para identificar los factores que afectan a la masa de contaminantes exportados y cómo reducirlos. La cantidad y tipo de sales exportadas por el drenaje de riego dependerá de la naturaleza de los minerales de las rocas del suelo y subsuelo, del manejo del riego y de la hidrogeología (Tanji y Kielen, 2002; Aragüés et al., 2011). La masa de nitrato lixiviado está directamente relacionada con la aplicación de fertilizantes de nitrógeno y el volumen de agua drenada (Ritter y Manger, 1985; Bjorneberg et al., 1996; Díez et al., 2000; Li et al., 2007). A nivel de parcela se ha demostrado que una mejora en la gestión del riego y fertilización puede disminuir la lixiviación de nitrato (Martin et al., 1994; Moreno et al., 1996; Sexton et al., 1996; Klocke et al., 1999; Díez et al., 2000; Sogbedji et al., 2000; Jaynes et al., 2001; Gheysari et al., 2009; Cui et al., 2010).

1.5 LASESA como zona de estudio

En el regadío del Valle del Ebro, las evaluaciones de regadío se han realizado en polígonos de riego por superficie o en zonas de riego por aspersión recién instaladas, pero nunca en regadíos por aspersión maduros donde se supone que se ha alcanzado un equilibrio hidrológico. Por esto se ha seleccionado una de las comunidades de regantes pioneras en la instalación de riego por aspersión en España, la comunidad de regantes de Lastanosa, Sena y Sariñena (LASESA). En esta comunidad se realizaron en el pasado dos proyectos fin de carrera de Ingeniero Técnico Agrícola desde la Escuela Politécnica Superior (EPS) de Huesca (Puliol, 1999; Ballester, 2003). Posteriormente se realizó para la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) un trabajo de evaluación de las aguas de retorno de riego por Cuchí (2001). Los resultados mostraron la existencia de un modelo hidrológico más complejo de lo inicialmente previsto a partir de desequilibrios en los balances de agua y sales. Entre las conclusiones se resaltaba que esta comunidad de regantes era una zona interesante para evaluar diversos parámetros relacionados con el riego por aspersión y se proponía continuar este estudio para obtener mayor información sobre el uso del agua y la cantidad y calidad de los retornos de riego.

2 Objetivos

OBJETIVOS

En esta tesis doctoral, que aborda el estudio del riego por aspersión en LASESA desde diversos puntos de vista, se pretenden conseguir los siguientes objetivos principales y secundarios:

- 1) Elaborar un modelo conceptual del sistema hidrológico:

Caracterizar los suelos y sus diversos parámetros hídricos.

Conocer las características hidrológicas del subsuelo.

Esbozar un modelo hidrológico conceptual.

- 2) Evaluar el manejo del riego por aspersión mediante el análisis de los datos de consumo de agua por cultivo y tipo de suelo:

Caracterizar el riego y evaluar su calidad.

Analizar la programación del riego actual y las posibles alternativas que mejoren la calidad del riego.

- 3) Analizar el uso del agua aplicando un modelo de contabilidad hídrica.

- 4) Cuantificar las masas de sales y nitrógeno de sus principales drenajes, para evaluar el lixiviado de sales totales y la eficiencia del abonado nitrogenado.

3 Descripción del área de estudio

3.1 Localización

El valle del Ebro alberga 783.950 ha, la mayor parte situadas al norte del río principal en las provincias de Navarra, Zaragoza, Huesca y Lérida, organizadas en comunidades de regantes de diversos tamaños. En Aragón, la más importante es la Comunidad General de Riegos del Alto Aragón (RRAA), que se suministra de agua procedente de los ríos Gállego y Cinca. Tiene una superficie regable que se aproxima a las 126.000 ha donde predominan los cultivos extensivos como maíz, cebada y alfalfa. Está organizada en 58 comunidades de regantes que se subdividen en tres tipos: 1) las modernizadas o transformadas en los últimos años, bajo riego por aspersión y a la demanda, 2) las transformadas en los años 80 y principios de los 90, con riego por aspersión con base en peticiones previas de agua y 3) las transformadas con anterioridad a los años 80 que se riegan por gravedad, requiriendo también petición previa de agua y que en general presentan una estructura parcelaria más atomizada que las restantes.

Para el presente trabajo se ha seleccionado la comunidad de regantes de LASESA (Figura 3.1). Fue una de las primeras en ser transformada a riego por aspersión y pertenece al tipo 2. Tiene un total de 9.786 ha repartidas en cinco sectores de riego (figura 3.2).

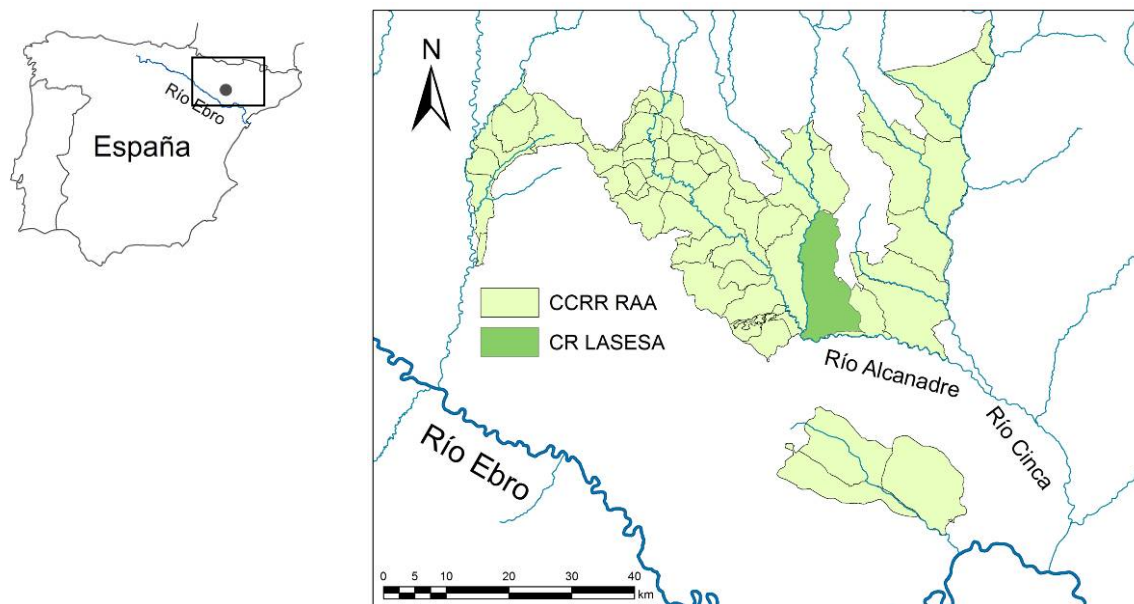


Figura 3.1. Mapa de situación: Comunidad General de Riegos del Alto Aragón (RRAA) y de LASESA.

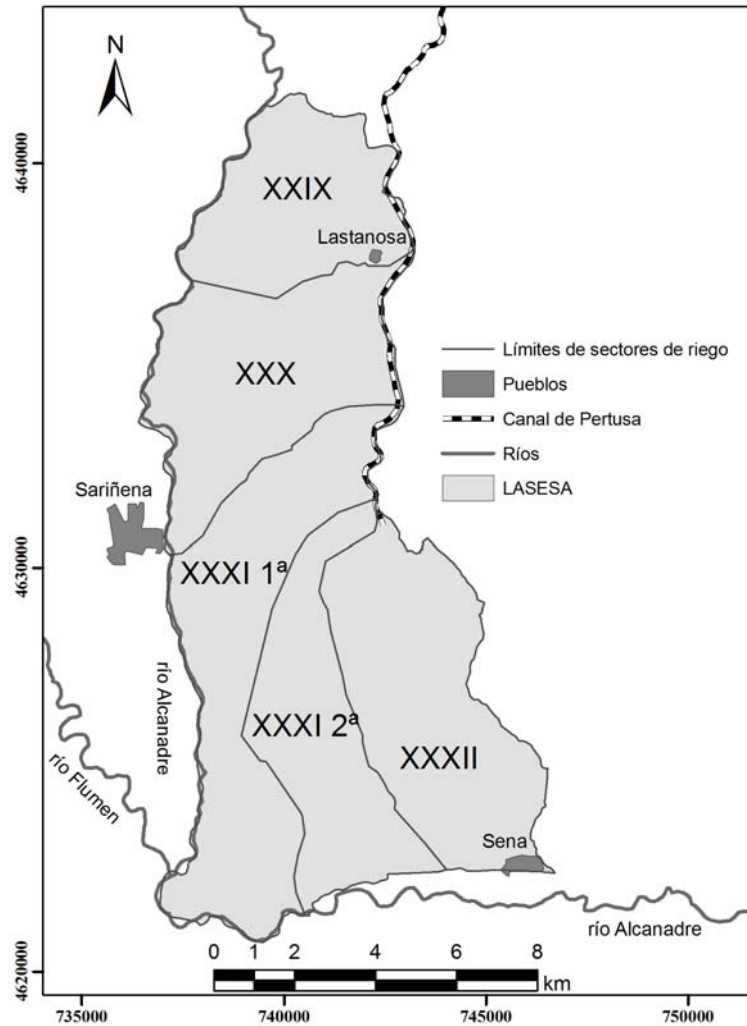


Figura 3. 2. Mapa de emplazamiento de los sectores de riego de LASESA.

LASESA se transformó a riego hacia 1980, a partir de la acequia de Pertusa. El proyecto fue redactado y dirigido por el Instituto de Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA). Lamentablemente no se ha podido localizar el proyecto original. Inicialmente se planteó para riego a pie, e incluso se construyeron algunos tramos de las acequias principales, que prácticamente no se usaron. Sin embargo, se modificó el proyecto a riego por aspersión, en su mayoría en cobertura total. Recientemente se ha construido un embalse de 10 hm^3 para aumentar su capacidad de regulación de agua y obtener una mayor independencia. La obra se encuentra en fase de pruebas.

LASESA se encuentra en la comarca de los Monegros, en los términos municipales de Sariñena (que incluye el antiguo término de Lastanosa), Sena, Castejón de Monegros, Villanueva de Sigena y Peralta de Alcofea, todos en la provincia de Huesca. (Figura 3.3)

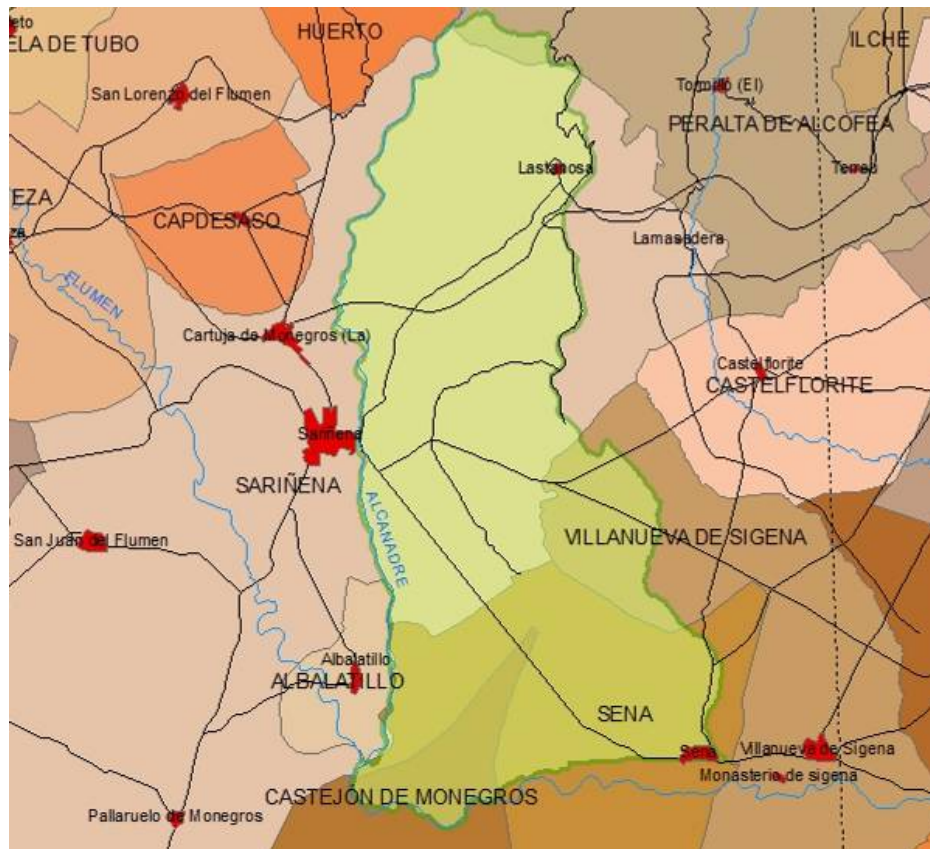


Figura 3. 3. *Mapa de términos municipales de LASESA.*

3.2 Geología

3.2.1 Historia geológica

Geológicamente, la zona regada por LASESA se asienta sobre areniscas y arcillas del Terciario continental; gravas del sistema de terrazas del río Alcanadre fundamentalmente del Pleistoceno así como depósitos limosos del Holoceno. Las dos últimas unidades forman depósitos de reducido espesor sobre los materiales terciarios.

Arcillas y areniscas pertenecen a la Formación Sariñena del Terciario Continental del Valle del Ebro. La unidad fue definida por Quirantes (1978) y engloba las zonas medias del gran abanico aluvial de Huesca (Nichols y Hirst, 1998). Su estratigrafía ha sido estudiada en detalle por Arenas (1993). Se trata de materiales depositados en un ambiente

árido y endorreico, a inicios del Mioceno, en una fase posterior a la orogenia pirenaica y anterior a la apertura del Ebro al Mediterráneo. Se asumen espesores acumulados de varios miles de metros de depósitos homogéneos.

Las condiciones cambiaron de acumulativas a erosivas, al producirse la apertura de la zona hacia el mar, se supone que hace unos 5 millones de años. En la zona monegrina, la erosión subsiguiente está eliminando de forma diferenciada a los materiales miocenos, quedando, a modo de testigo, la sierra de Alcubierre-Ontiñena. El vaciado de la depresión entre la actual Sariñena y las sierras del Prepirineo se hizo gradual y escalonadamente, dando lugar a una serie de rampas o glacis en graderío que arrancaban de las sierras prepirenaicas o, alternativamente, al otro lado del Alcanadre, de la sierra de Alcubierre (Alberto et al., 1984). Estas superficies, están recubiertas por cantos de caliza y silíceos, arrastrados desde el Prepirineo por corrientes temporales y probablemente torrenciales. En la zona, está representado por el saso de las Fitass, que domina LASESA por el este.

Posteriormente, desde el Pleistoceno superior, se instala una red fluvial, de dirección norte-sur, quizás parcialmente heredada de la preexistente antes de la apertura al mar. Esta red se encaja progresivamente y sufre una serie de capturas asociadas hacia el este. Una de ellas, ha formado el gran cambio de rumbo que el actual Alcanadre experimenta entre Sariñena y Sena. Se contabilizan 6 niveles de terrazas en esta zona. Para Badía et al. (2010), por comparación con terrazas en el Cinca, tienen cronologías que van desde el Pleistoceno Inferior al Holoceno. Entre estas unidades de terrazas se han desarrollado laderas regularizadas e incluso pequeños glacis.

El encajamiento del Alcanadre y el clima semiárido han desarrollado una serie de barrancos locales (Picardón, Las Vacas, Miranda, Malfarás, Los Arnales y Carnerario). Malfarás y Arnales drenan las diversas terrazas del río principal, aunque su cabecera tiene un desarrollo significativo en los materiales terciarios. Estos pequeños cauces presentan depósitos limosos en su fondo, derivados de la erosión de los materiales terciarios próximos y formando fondos planos tipo val. Al igual que en otras zonas monegrinas, suelen estar reincidentos por la erosión.

3.2.2 Geomorfología

La zona de LASESA se divide entre dos grandes unidades morfológicas. Al norte, en el sector XXIX y sureste en el barranco del Carnerario el paisaje está dominado por las formas erosivas en materiales Terciarios. La erosión exhuma los bancos de arenisca, más resistentes, formando cerros testigos tabulares, creando un relieve estructural. En las laderas de los cerros aparecen grandes bloques de arenisca caídos por descalzamiento y rodadura al erosionarse los materiales finos subyacentes. Estos forman laderas regularizadas.

En el fondo de los barrancos, se acumulan los materiales finos dando rellenos laminares tipo “val”, que pueden alcanzar espesores de hasta 10 metros. Suelen estar reincididos, formando terrazas laterales con terreros verticales frecuentemente colonizados por los abejarucos (*Merops apiaster*). Se supone que son del Holoceno, incluso de la pequeña Edad de Hielo, pero en esta zona no hay indicios arqueológicos o paleontológicos.

El resto de LASESA tiene un paisaje más suave, cubierto por seis terrazas escalonadas del Alcanadre, cuyo espesor no suele sobrepasar la decena de metros. Las más elevadas y antiguas presentan un encostramiento importante mientras que en las más bajas y recientes, la translocación de carbonato cálcico es incipiente. Las laderas regularizadas y los pequeños glaciares entre terrazas son más recientes que sus terrazas parentales, y tampoco parecen presentar encostramientos importantes (Badía et al., 2010). Como se ha señalado, por encima del sistema de terrazas fluviales, y ya fuera de la zona regada, se encuentra la superficie del Saso de las Fitas, importante glacis que a través del Somontano se enraíza con la Sierra de Guara.

La acción humana, a través de la nivelación y puesta en riego, ha modificado profundamente la morfología natural.

3.2.3 Litología

La litología está dividida en tres unidades: areniscas y arcillas del Mioceno continental, gravas de las terrazas del Alcanadre y rellenos de vales.

Mioceno Continental. Se trata, de una alternancia subhorizontal de bancos de areniscas, limolitas y lutitas. Las areniscas, localmente denominadas “piedra de arena”, se

presentan en bancos de espesor centimétrico a métrico, engrosados localmente en paleocanales. Es una arenisca heterogénea en textura, formada por granos de cuarzo, carbonato cálcico, plagioclasas, micas y terrígenos. Localmente puede presentar cantos redondeados de gravilla y cemento carbonatado, más abundante en la periferia de los afloramientos que en el interior. Como matriz pueden presentar un porcentaje pequeño de arcillas y limos. También aparecen impregnaciones puntuales de minerales de cobre, como en Lotes de Castejón. El color es pardo en alterado y gris en fresco. Se arenizan con facilidad. Los bancos presentan fracturación vertical antigua, de espaciado irregular, de tipo tectónico extensivo. También presentan facturaciones paralelas al frente de los cerros por rotura debida a descalzamiento. Se les asigna una conductividad hidráulica media-baja, que puede ser moderada en función de la presencia de fracturas o de ausencia de cementación. El material más fino, limolitas y lutitas, localmente denominado “salagón”, presentan una estratificación horizontal de centimétrica a métrica con colores variables desde grises a ocre y pueden presentar manchas rojizas de tamaño milimétrico a centimétrico. Su mineralogía es compleja, con presencia generalizada de carbonato cálcico y frecuente presencia de ilita. Los materiales terciarios están poco litificados. Se les atribuye una baja conductividad hidráulica. Se alteran con facilidad produciendo limos y arcillas, fácilmente transportados por viento y agua. Pueden presentar blancas impregnaciones de evaporitas.

Terrazas aluviales. Formadas por depósitos de arenas, gravas y cantos rodados. Son predominantemente calcáreos, sobre todo de aporte prepirenaico. En las terrazas más antiguas, presentan un importante grado de corrosión y reprecipitación secundaria de carbonato cálcico (pendants, mallacán). También hay un porcentaje significativo y localmente variable de cantos silíceos. Son originarios del Pirineo axial, por lo que se presume que pueden ser reheredados de los conglomerados de la sierra de Cancías, en la cabecera del Alcanadre o de la sierra de Rufas, en el límite entre el Prepirineo y Somontano.

Rellenos de vales. Formados por materiales resedimentados del Terciario continental, con presencia ocasional de cantos derivados de las terrazas. Texturas heredadas, predominantemente limo-arcillosas. Estos materiales removidos son también conocidos como “salagón”, lo que produce alguna confusión con los materiales originales.

3.3 Hidrología

La hidrología de la zona está controlada de forma natural por el curso del Alcanadre que rodea por el oeste y sur a LASESA. Este río nace al norte de la sierra de Guara y desemboca en el Cinca, a la altura de la localidad de Ballobar. Recoge numerosos afluentes, entre ellos Guatizalema y Flumen. Este último desemboca, por la derecha, aguas debajo de Sariñena, drenando una amplia zona de riegos.

Por el territorio de LASESA, situado en la orilla izquierda del Alcanadre, descienden varios barrancos, algunos de los cuales tienen las cabeceras en el Saso de las Fitass. En condiciones naturales, antes de la transformación en regadío, sólo debían llevar agua durante las épocas de lluvia. Los más importantes son los de Malfarás, Arnales y Carnerario.

En el pasado, antes del desarrollo del regadío, el único aporte de agua sobre la superficie actual de LASESA era la lluvia. Una parte muy limitada de esta, probablemente menos del 10% de la precipitación total anual, se infiltraba por las gravas de las terrazas del Alcanadre. El agua percolada, al alcanzar el nivel de margas terciarias, alimentaba un acuífero muy modesto que fluía hacia el Alcanadre y se utilizaba en balsas y pozos excavados a mano. Además, es posible que existan varios acuíferos en niveles de areniscas subhorizontales a cierta profundidad en el Mioceno.

El desarrollo del regadío con una aportación de agua de 90 hm³ anuales a través del canal de Pertusa ha modificado la hidrología natural, tanto superficial como subterránea. Los barrancos naturales han sido acondicionados para servir de drenajes principales que generalmente definen los límites de sector. El barranco de los Arnales actúa también como desagüe de la acequia de Pertusa. En el polígono XXIX se han adaptado también los pequeños barrancos de Las Vacas, Picardón y Miranda. En la zona sur se abrió un importante colector artificial, que corta la zona de Presiñena y constituye la separación entre los sectores XXXI 1ª y XXXI 2ª. Además también actúan, como drenes de facto, las trincheras, actual y antigua, del ferrocarril.

El incremento en la recarga, por efecto del regadío, ha supuesto un ascenso general del nivel del freático, no cuantificado, en el acuífero aluvial. Dado que la grava presenta una alta transmisividad, este incremento de nivel viene contrarrestado tanto por un aumento del flujo natural así como por la instalación de diversos colectores secundarios

por los propietarios. La mayor parte del agua de drenaje fluye hacia los colectores principales directamente al Alcanadre. Una parte lo hace en forma de rezumes en los taludes de transición entre terrazas. Se asume, en una primera aproximación que el porcentaje de agua que se pierde en los rezumes es mucho menor que la que se recoge en los drenes superficiales.

En los terrenos predominantemente arcillosos del sector XXIX, el incremento de la recarga es menor dada la mayor impermeabilidad del terreno por su textura fina. Esto se traduce, por un lado, en una mayor erosión del suelo, por lluvias naturales y riego por aspersión, que se evidencia en los regueros que se forman en el suelo recién laboreado así como en el transporte de sedimentos por los colectores más importantes. Esta menor infiltración ha creado, además, pequeños acuíferos, inexistentes en condiciones naturales, a favor de suelas de laboreo y horizontes edáficos modificados por subsolados, nivelaciones y zanjas de instalación de tuberías de riego y drenaje. Estos acuíferos, de tipo libre, y con características tipo “perched”, se suelen formar en zonas de vaguadas.

La existencia de texturas limosas en una parte de los materiales geológicos favorece los procesos de arrastre de finos, creando cárcavas y toperas (piping). El problema se agrava por la existencia de sodio en una parte del material geológico. En ausencia de yeso natural o aportado, el riego con agua del Cinca provoca la hidrólisis de las arcillas con desfloculación de las mismas. Esto produce un barro desestructurado, con muy baja conductividad hidráulica que seca muy lentamente y colmata a gran rapidez los drenes colectores. También es la causa de la degradación y deslizamiento lateral de laderas, como se observa en las inmediaciones del inicio de la carretera a Lastanosa y cercanías de la ermita de Santiago en Sariñena.

Las características hidrogeológicas de los materiales geológicos y edafológicos permiten una primera clasificación en función de su conductividad hidráulica:

Materiales permeables – semipermeables, divisibles en:

a) Gravas, arenas y limos del recubrimiento Cuaternario. En la zona no saturada, el agua circula fundamentalmente por percolación vertical. En la zona saturada se presume un flujo subterráneo preferentemente horizontal hacia el Alcanadre.

b) Areniscas del sustrato Terciario. Cuando están alteradas o poco cementadas, el agua circula por percolación. También puede fluir por las diaclasas y fracturas existentes.

En los afloramientos más cementados el agua fluye fundamentalmente por escorrentía superficial. Diversos sondeos realizados en Monegros y Hoya de Huesca, al norte de LASESA, indican la presencia, en profundidad, de arenas no cementadas que almacenan agua subterránea (Cuchí, 1998). Es posible que los bancos cementados de areniscas, que afloran en el paisaje, sean consecuencia de una cementación secundaria por precipitación de carbonato cálcico al evaporarse las aguas subterráneas que las arenas iniciales transportan. Con el actual grado de conocimientos, se supone que estos acuíferos no tienen importancia en la zona de estudio.

Materiales impermeables, formados por el resto del Terciario limoarcilloso y las areniscas sanas (Barbany y Vélez, 2004).

3.4 Climatología

El clima de la zona donde se sitúa LASESA es mediterráneo continental. Se organiza en dos grandes fases de estabilidad, en invierno y verano, separadas por fases de inestabilidad en primavera y otoño. En estas dos últimas estaciones, el desplazamiento hacia el sur del frente polar, arrastra series de frentes sobre la península ibérica, que ocasionan precipitaciones e inestabilidad. En las restantes estaciones predomina el anticiclón de las Azores. Durante el invierno, las características anticiclónicas provocan largos periodos de inversión térmica que se traducen en densas nieblas o importantes heladas de radiación. El efecto lateral de sistemas frontales que circulan al norte de la cordillera provoca fuertes vientos del norte que se encajan en dirección noroeste en el valle del Ebro. El cierzo produce fuertes descensos de sensación térmica, deseca el ambiente y la superficie del suelo y provocan daños por congelación en la vegetación. Por otro lado, el efecto de la barrera pirenaica se traduce en una sombra de lluvia al sur de la cordillera, con respecto a las precipitaciones de origen atlántico, causa final de la aridez monegrina. En el verano, la estabilidad climática se rompe por tormentas derivadas de fenómenos convectivos de algunas horas de duración, que se desarrollan habitualmente desde el mediodía hasta la caída de la tarde.

La meteorología de la zona de estudio se ha caracterizado con datos de la cercana estación agroclimática del Puyalón en Sariñena (UTM X: 734.771 m Y: 4.628.457 m; Huso 30) de la red del Servicio Integral de Asesoramiento al Regante del Ministerio de

Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (Oficina del regante, 2011). En el cuadro 3.1 se presentan los datos para el periodo 2003-2009.

Cuadro 3.1. Datos climatológicos 2003-2009 de Puyalón (Sariñena). Valores medios de precipitación, temperaturas máxima (T_{máx}), mínima (T_{mín}) y media (T_{med}), humedad relativa (HR), velocidad del viento (v) y evapotranspiración de referencia según FAO Penman-Monteith (ET₀).

Meses	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)			HR (%)	v (m/s)	ET ₀ (mm)
		T _{máx}	T _{mín}	T _{med}			
Enero	16,3	18,6	-6,9	4,7	81,7	2,0	31,7
Febrero	21,8	18,1	-5,7	5,8	74,9	2,0	44,3
Marzo	19,5	24,6	-4,0	9,5	64,6	2,9	90,1
Abril	60,7	27,8	0,8	12,8	66,9	2,4	110,0
Mayo	51,0	32,5	4,4	17,5	60,4	2,3	152,3
Junio	24,0	37,1	8,7	22,4	54,7	1,9	183,3
Julio	16,3	37,6	11,6	24,5	51,8	2,2	205,4
Agosto	21,2	36,2	10,7	23,3	55,7	1,8	153,3
Septiembre	38,4	33,5	6,3	19,7	64,8	1,6	111,6
Octubre	45,4	28,6	2,2	15,0	72,9	1,7	70,7
Noviembre	22,5	20,1	-3,4	8,5	77,7	1,8	37,2
Diciembre	29,5	17,1	-6,0	4,3	82,7	1,9	26,5
Año	366	28	2	14	67	2	1.216

Fuente: <http://servicios.aragon.es/oresa/>

3.4.1 Temperaturas

La evolución anual de la temperatura pone de manifiesto los rasgos continentales de la comarca, con inviernos y veranos de larga duración separados por una primavera y un otoño más cortos. El frío invernal y el fuerte calor estival prevalecen durante gran parte del año, reflejo de la gran inercia térmica que domina en las zonas interiores. El invierno suele durar unos 120 días, desde mediados de noviembre a marzo, aunque las heladas pueden llegar hasta finales de abril, afectando a diferentes cultivos. La primavera no supera los 60 días, hasta mediados de mayo. El verano se prolonga durante más de 150 días, hasta octubre, y el otoño tan solo dura unos 40 días. La temperatura media anual es de 14°C. El mes más cálido es julio, con valores cercanos a 25°C, seguido de agosto con algo más de 23°C. Por el contrario, diciembre y enero son los más fríos, con una temperatura media cercana a los 4,5°C. Ello supone una oscilación media anual de 20°C. El rango de temperaturas medias extremas es de 44,5°C y la oscilación máxima absoluta alcanza los 52,1°C.

3.4.2 Precipitaciones

Monegros se encuentra en una zona de sombra de lluvia, por efecto "foehn" de las masas de aire atlántico que abordan el Pirineo desde el norte. Esto hace que el aire que alcanza la depresión del Ebro sea cálido, tenga escasa humedad relativa y en consecuencia vea muy reducidas las posibilidades de precipitación. Por el contrario, es alta la capacidad evaporante que induce un fuerte estrés veraniego a la vegetación. En verano, las precipitaciones convectivas muy localizadas pueden tener fuerte intensidad y corta duración, en compañía de granizo, derivadas de nubes de evolución vertical diurna. El valor medio anual (2003-2009) es de 366 mm, con una irregularidad interanual cercana al 25%. Por su parte, Liso y Ascaso (1969) indican una precipitación media de 387 mm, para un periodo de 22 años. Abril es el mes con mayor pluviometría, con una media de 60,7 mm. Los meses menos lluviosos son enero y julio con una precipitación media de 16,3 mm. Hay que señalar que las tormentas estivales tienen distribución errática en el tiempo y el espacio, pudiendo incrementar significativamente el total anual.

3.4.3 Humedad relativa

La atmósfera monegrina es seca en verano, con una humedad relativa media de 51,8% en julio. Este valor alcanza 82,7% en diciembre. La humedad relativa media anual está por encima del 67 %. Hay periodos de persistentes nieblas de noviembre a enero.

3.4.4 Viento

El cierzo es frecuente, con 109 días al año, sobre todo en primavera y otoño. La velocidad media del viento es de 2 m/s, con una máxima de 2,9 m/s en marzo. Elimina los sistemas nubosos, la humedad relativa cae espectacularmente a valores cercanos al 25%. Su acción desecante es muy intensa, al potenciar la evapotranspiración. El viento afecta de forma muy importante al riego por aspersión. Produce un importante descenso en la uniformidad de aplicación del riego por aspersión en esta zona y un aumento en las pérdidas por evaporación y arrastre (Sánchez et al., 2010).

3.4.5 Evapotranspiración

La evapotranspiración anual en la zona tiene valores altos debido a la elevada temperatura, fuerte viento y baja humedad relativa. Liso y Ascaso (1969) indican valores de 975 mm para Sariñena y 791 mm para Sena, por el método de Thornthwaite, que superan claramente a las precipitaciones anuales. La utilización de los datos de las estaciones agroclimáticas permite el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0) por el método FAO-56-Penman-Monteith (Allen et al., 1998), cuyos datos se presentan en el cuadro 3.1. La ET_0 anual se sitúa en 1.216 mm. Julio presenta el mayor valor de ET_0 , 205,4 mm y el mínimo es en diciembre con 26,5 mm.

3.5 Cultivos

Para el presente estudio, se ha analizado la evolución de los cultivos tomando como base las declaraciones a la Política Agraria Comunitaria (PAC) del periodo 2003-2009, de los siete últimos años, obtenidos de la Diputación General de Aragón (DGA) (Cuadro 3.2). Los cultivos mayoritarios en LASESA son maíz, alfalfa, cebada, guisantes y otros cultivos forrajeros. Durante el periodo considerado no se declaraban los cultivos de segunda cosecha. Sin embargo, datos propios de campo, para 2009 indican un 26% de la superficie con doble cultivo. Al contrastar con las solicitudes de ayudas PAC para el citado año se observan declaraciones tanto de cultivo de invierno (cebada, guisante) como de cultivo de verano (maíz) para las parcelas con doble cultivo. También se observaron sobre el terreno algunas parcelas de maíz que habían sido declaradas en la PAC como retirada, probable consecuencia de modificaciones de última hora ante la subida de precios. Estas modificaciones han sido tenidas en cuenta en el estudio realizado.

A partir del cuadro 3.2 se observa que la sequía del 2005 produjo un cambio en las tendencias de siembra. Éste año se caracterizó por un acusado descenso de las precipitaciones de primavera acompañada de una ausencia de manto nival en el Pirineo. Como consecuencia, los embalses que abastecen al sistema de regadíos del Alto Aragón, recibieron aportaciones por debajo de la media y hubo restricciones en el agua disponible por hectárea.

Hasta ese momento el maíz, prácticamente como cultivo único ocupaba más del 50% de la superficie cultivada. Al concentrar el agua disponible, muchas parcelas

quedaron sin sembrar y la superficie de retirada para el año 2005 superó rotundamente la media de los últimos siete años (16% frente al 6,6%). El segundo cultivo en importancia era la alfalfa y, hasta ese momento, la cebada era casi un cultivo marginal. La experiencia de la sequía influyó en las siembras de años posteriores aumentando la superficie de cultivos de invierno. Tras estos, en función de la disponibilidad de agua, han aumentado las siembras directas de maíz de ciclo corto y simultáneamente se ha producido una ligera disminución del maíz como cultivo único. Los agricultores, muy influenciados por los precios de compra de los cereales, abonos y fitosanitarios parecen optar por un sistema de doble cultivo donde la cebada compensa la disminución de producción en el maíz. Este procedimiento permite también adaptarse a la disponibilidad de agua para el verano. En todo caso, hay que matizar el aparente descenso del maíz, dado que son datos de las declaraciones PAC (Cuadro 3.2). Según datos propios, que se presentan más adelante, en 2009 la superficie de maíz alcanzó el 55%, valor muy similar a los de 2003 y 2004. En este año, el porcentaje de maíz como segundo cultivo después de cebada y guisante fue del 82% de la superficie del primer cultivo.

Cuadro 3.2. *Distribución de cultivos en LASESA entre los años 2003 al 2009 según las declaraciones de la PAC.*

Cultivo	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	MEDIA
	-----%-----							
Maíz	52,4	52,4	49,6	42,6	46,9	35,3	32,4	44,5
Alfalfa	23,6	24,1	16,9	17,1	16,9	16,0	27,4	20,3
Cebada	3,8	4,0	6,8	18,8	19,6	31,1	21,6	15,1
Guisantes	1,4	2,0	4,3	4,9	2,8	5,3	4,0	3,5
Otros cultivos forrajeros	6,1	6,3	1,8	3,1	2,1	1,6	3,2	3,4
Frutal	3,1	3,0	2,1	2,0	2,0	2,1	2,0	2,3
Otros cultivos	1,3	0,4	1,2	6,7	1,5	1,4	2,9	2,2
Trigo	0,7	1,3	1,0	2,0	3,1	2,6	1,2	1,7
Hortaliza	0,7	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,1	0,3
No cultivo	6,9	6,2	16,0	2,6	4,7	4,5	5,3	6,6

La alfalfa ha seguido una evolución diferente, dado que su ciclo de cinco años le hace menos flexible a los cambios. En el mismo año de la sequía (2005) se disminuyeron a la mitad las ayudas a la transformación en alfalfa deshidratada. Esto se tradujo en una disminución del 30% de su superficie. El repunte del 2009 se debe a un aumento de exportaciones hacia países del Golfo Pérsico.

La volatilidad en los precios de los cereales, el desacoplamiento total de las ayudas a la transformación en alfalfa y las actuales negociaciones sobre la PAC futura hace muy difícil predecir cuál va a ser la evolución de la distribución de los cultivos.

3.5.1 Maíz

El maíz es el cultivo más extendido. Como se ha señalado, se detecta un auge de la siembra directa, muchas veces como segundo cultivo después de cebada o guisante.

Al maíz como cultivo único se suele aplicar un abonado de presembrado ("fondo") en torno a la primera quincena de abril. Los agricultores que tienen explotaciones de porcino intensivo aplican el purín entre enero y marzo. Posteriormente se labra la tierra con rotocultivador ("fresadora o rotovator") para dejar el suelo preparado. Se siembra normalmente durante la segunda quincena de abril utilizándose variedades de ciclos 600 y 700, con una media de 86.000 plantas ha⁻¹. Inmediatamente después de la siembra se aplica herbicida de pre-emergencia. Los riegos por aspersión, se suceden cada 2-3 días y en cada riego se aplica una media de 150 m³ ha⁻¹. El primer riego se hace una semana después de la siembra (final de abril) y el último en la 1ª quincena de septiembre. La primera cobertera se aplica en la segunda quincena de mayo cuando la planta tiene 8 hojas. En junio se trata con herbicida de post-emergencia, sólo en aquellas zonas del campo con presencia de *Sorghum halepense*. Con los riegos de junio se aplica una segunda cobertera de abono líquido y en algunos casos se aplica una tercera, e incluso otra cuarta cobertera en julio, antes del penacho. Se cosecha a finales de octubre o principios de noviembre, con unos rendimientos en torno a los 13.500 kg ha⁻¹ (14% de humedad). Es habitual la realización de un secado artificial excepto cuando se deja secar en la planta hasta enero o febrero. En los meses de noviembre y diciembre se pica el rastrojo de maíz. Luego, de diciembre a marzo, se dan dos pasadas con un "chisel", y una pasada con un subsolador. El orden y fecha de estas tres labores depende de cada agricultor.

En el caso de maíz sembrado después de guisante para industria, lo que varía respecto al maíz como cultivo único, son las labores previas a la siembra y las fechas de cultivo. El guisante se cosecha en la segunda quincena de mayo. En el plazo de una semana se labra el rastrojo del guisante con un subsolador dos pasadas con un "chisel", seguidas de rotocultivador y siembra del maíz. La fecha de siembra por tanto es a finales de mayo o principios de junio. Se siembran los ciclos ya señalados en el apartado anterior o ciclos

más cortos. El primer riego se realiza uno o dos días después de la siembra y el último la 1ª semana de octubre. Con los riegos de junio se aplica una primera cobertera de abono líquido y una segunda en julio o agosto. Se cosecha en noviembre, con unos rendimientos en torno a los 13.000 kg ha⁻¹, en las condiciones ya señaladas.

Evidentemente, en el caso de maíz con siembra directa después de cebada no hay labores previas a la siembra. La cebada se cosecha la primera quincena de junio y acto seguido se siembra-abona y riega el maíz. La primera cobertera se aplica cuando la planta tiene 5 hojas y la segunda antes del penacho. Las dos se aplican con abono líquido diluido en los riegos. Se cosecha en noviembre, con unos rendimientos próximos a los 11.500 kg ha⁻¹.

3.5.2 Alfalfa

Tras un mínimo de dos años de descanso, normalmente ocupados por maíz, se prepara la cama de siembra mediante pase de subsolador y rotocultivador. Algunos agricultores esperan a la primavera aunque lo habitual es adelantar la siembra al otoño. Se aplica un abonado de fondo, relativamente alto, del orden de 100 kg de N por hectárea. Se utilizan dosis de 40 kg ha⁻¹ de semilla. Cuando la alfalfa ya está implantada, del 2º año en adelante, recibe dos o tres abonados de cobertera en abril, junio y agosto con dosis bajas de N. Normalmente la alfalfa se mantiene en el campo unos cinco años y recibe cinco cortes al año, el primero a final de abril y el último a final de octubre, con un intervalo entre cortes de 35 días. La alfalfa recibe unos cincuenta riegos durante la campaña. La producción en materia seca es de 15.000 kg ha⁻¹año⁻¹. Toda la producción se destina a deshidratado en plantas locales. Se considera un cultivo muy interesante, ligado a las ayudas a deshidratadoras y un importante mercado en la península arábiga.

3.5.3 Cebada

La cebada de 2 carreras es la que ocupa mayor superficie. En noviembre, tras la cosecha del maíz, el rastrojo se pica y luego, se dan dos pasadas con un "chisel". Antes de la siembra se aplica el abonado de fondo. La siembra de la cebada se hace normalmente en noviembre o diciembre con un "tren de siembra", formado por un rotocultivador y una sembradora. Algunos agricultores realizan las labores por separado. La dosis de siembra

es de 200 kg ha⁻¹. Recibe 15 riegos de media, en función de la pluviometría. Se pueden realizar riegos en otoño para preparar el suelo y facilitar la nascencia, y otros en primavera en la fase de cuajado. En marzo se da una aplicación de herbicida, y días más tarde se aplica la primera cobertera. El abono de las coberteras es mucho más rico en nitrógeno que el de fondo. La cosecha se realiza a primeros de junio. Los rendimientos oscilan entre 5.000 y 7.000 kg ha⁻¹, al 12% de humedad. En general, el cultivo siguiente es maíz. La paja se puede empacar dependiendo de si su volumen dificulta la siembra directa del maíz, del precio de la paja y de la costumbre del agricultor. Actualmente lo habitual es empacar la paja y después hacer la siembra directa del maíz. El 80% de la superficie cultivada con cebada tras su recolección se pasan a maíz en siembra directa.

3.5.4 Guisante

El guisante para congelado es un cultivo contratado con empresas de La Rioja y Navarra. Se labra la tierra en diciembre mediante dos pasadas con un “chisel”. Luego se aplica un abonado de presiembra en torno a la primera quincena de enero, y tras éste se prepara la tierra con rotocultivador para la siembra. La semilla es suministrada por las empresas conserveras. La fecha de siembra es normalmente a mediados de enero utilizándose un “tren de siembra”. La dosis media de siembra es de 220 kg ha⁻¹. Algún agricultor aplica el purín en febrero. A primeros de abril se le da un tratamiento fungicida. El primer riego se hace cinco días después de la siembra (final de enero) y el último en la 2ª quincena de mayo. Los riegos se suceden cada 11 días. Se cosecha por maquinas propiedad de las empresas conserveras en la 2ª quincena de mayo, con unos rendimientos que oscilan entre 4.000 y 6.000 kg ha⁻¹, pudiéndose llegar hasta rendimientos de 8.000 kg ha⁻¹. Se suele sembrar maíz a continuación.

3.5.5 Otros cultivos

Existen diversos cultivos minoritarios. En terrenos de baja calidad se cultiva el ray grass como cultivo forrajero. Lo normal es dar dos o tres cortes que se henifican y se empacan para engorde de ganado. También se destina para producción de semilla. En algunos casos se pica en verde y se transporta a plantas deshidratadoras de alfalfa. El trigo es muy minoritario y se cultiva principalmente en pequeñas parcelas de Sena. Almendros y

olivos se reparten en pequeñas parcelas por toda LASESA y se riegan por goteo. También por goteo hay algunos frutales, especialmente una explotación grande de melocotonero en Sena. Algo de girasol se ha cultivado en la zona norte. La suma de todas estas superficies de cultivos minoritarios es menor del 10%.

3.6 Ganadería

La ganadería extensiva, importante en el pasado, actualmente es residual. Quedan algunos rebaños de ovejas, menos de 6.000 cabezas, desligadas de la trashumancia tradicional. La ganadería actual es fundamentalmente de tipo intensivo y ciclo cerrado. Hay una docena de granjas dentro de LASESA. El porcino alcanza a unos 26.000 cerdos, en su mayor parte de engorde. El vacuno, también de engorde, no llega a los 600 terneros. En la periferia de la zona regada existe un número mayor de explotaciones pecuarias intensivas.

4 Suelo y aguas subterráneas

4.1 Suelo

4.1.1 Introducción

La disponibilidad de agua en el suelo es el principal limitante de la productividad de los sistemas agrícolas (Artigao y Guardado, 1993; Villalobos, 2002). En zonas donde las necesidades hídricas de los cultivos son superiores a la precipitación, el riego compensa este déficit. Sin embargo supone una alteración del régimen hidrológico natural de los suelos y aplicado en exceso lleva a problemas como encharcamiento y salinización (Pulido, 1994; Herrero, 1999; Singh, 2005). En la actualidad, el riego ha sido ampliamente tecnificado y descansa sobre principios perfectamente determinados. Una aplicación racional del riego permite mitigar problemas derivados como el despilfarro de agua, la contaminación de acuíferos, la eutrofización de las aguas superficiales, etc. (Urbano, 1997).

Es evidente que una correcta programación del riego obliga a conocer las características del suelo sobre el que se aplica. Parámetros importantes son la textura, la profundidad de suelo, la velocidad de infiltración y la capacidad de almacenamiento de agua. Para aplicar esto a LASESA, se ha realizado una revisión de la bibliografía existente para la zona de Monegros. Los estudios del suelo en esta zona se pueden clasificar en tres grupos: 1) Cartografía a gran escala, que cubren una amplia superficie (Guerra et al., 1970; Alberto et al., 1984), 2) Estudios de información previa a la puesta en riego para el Instituto Nacional de Colonización (INC), luego Instituto de Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA). No están publicados y son de difícil localización. Además es posible que existan varias versiones para una misma zona. IGN (2006) presenta un listado de estos informes para Monegros. Para LASESA es de utilidad el realizado por RENASA (1975) y 3) Artículos de investigación y tesis doctorales (Berga, 1993; García-Vera, 1996; Nogués, 2002; Herrero et al., 2007). Algunos presentan énfasis en los suelos salinos (Aragüés, 1982; Herrero, 1982; Cuchí, 1989; Herrero et al., 1989; IGN, 2006; Herrero, 2008; Badía et al., 2011). Como se ha señalado, la única cartografía de suelos de la zona de LASESA se hizo antes de su puesta en riego por RENASA (1975). Este informe, que abarca una amplia zona indica que los suelos de la actual LASESA serían mayoritariamente, en sur y centro, de tipo Typic Calciorthis y Typic Paleorthid. En el norte, actual sector XXIX predominan suelos Typic Xerorthents. El estudio señala la poca profundidad y pedregosidad de los primeros suelos mencionados en los que recomienda

una técnica de riego muy cuidadosa. Además realizaba diversas recomendaciones para la puesta en riego, algunas de las cuales fueron tomadas en cuenta.

Ante la inexistencia de una información adecuada para un estudio hidrológico, se ha realizado un estudio edafológico, haciendo hincapié en la hidrología de los suelos.

4.1.2 Metodología

La metodología general del presente capítulo se basa en la subdivisión de unidades morfoedáficas relativamente homogéneas, dentro de las cuales se han realizado calicatas, muestreos y ensayos “in situ” y en laboratorio.

4.1.2.1 Identificación de unidades.

La identificación de unidades homogéneas se ha basado en los mapas geomorfológicos (Hojas 357 Sariñena y 325 Peralta de Alcofea) del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), rebautizado temporalmente como Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE). Para la hoja de Sariñena están publicados los mapas geológico y geomorfológico (ITGE, 1998). En la hoja de Peralta de Alcofea (IGME, 1972) sólo está georeferenciado el mapa geológico y el mapa geomorfológico se ha podido conseguir en formato JPEG. La información se transpuso sobre el mapa geológico de esta hoja que si estaba georeferenciada. A partir de estos mapas y mediante el uso del software ArcGis 9.2 se ha construido un mapa geomorfológico georeferenciado de toda LASESA, corrigiendo el desfase cartográfico que se ha observado entre ambas hojas. Se presenta en la figura 4.1.

A partir del mapa se deduce la existencia de grandes unidades morfológicas cuyas características debieran tener reflejo en los suelos desarrollados sobre ellas, al haberse generado en condiciones semiáridas. La unidad de mayor desarrollo son los sasos, terrazas fluviales y laderas que se desarrollan sobre gravas redondeadas de origen fluvial. Su edad oscila entre 1-2 millones de años para el Saso de las Fitas hasta depósitos muy recientes, en el cauce del río Alcanadre. El Saso de las Fitas queda fuera de la zona regada pero es allí donde se ubican algunas de las balsas de riego. Hay una serie de terrazas fluviales, escalonadas en descenso hacia el río. Están conectadas por una serie de laderas, donde

coluviones de grava de las terrazas superiores se superponen sobre los materiales terciarios. Barras y depósitos de canal, fondos de valle y llanuras de inundación se presentan en las orillas del Alcanadre. Tienen muy poca representación en la zona. No se cultivan, salvo alguna zona de llanura de inundación regada por el riego tradicional de Sena.



Figura 4.1. Mapa Geomorfológico de LASESA según ITGE y ubicación de perfiles y ensayos de infiltración.

Sobre el Terciario continental se forman suelos de texturas finas. Por su impermeabilidad, están sujetos a procesos erosivos. En la zona norte, sector XXIX, se combinan con litosuelos sobre areniscas. Los rellenos de vales han sido heredados de materiales erosionados en las otras dos unidades, especialmente del Terciario.

4.1.2.2 Medición de la infiltración del agua en el suelo

A partir de las unidades definidas en el apartado anterior se seleccionaron diversos puntos para la medida de la infiltración del agua en el suelo. Se realizaron 17 ensayos de infiltración, tres repeticiones en cinco parcelas de regadío, entre el 22 y el 29 de julio de 2011. Los puntos también se presentan en la figura 4.1. En la localización dentro de las parcelas se evitaron las toperas y las zonas no representativas. A pesar de ello se eliminó a posteriori un ensayo paralelo a los ensayos 7 y 8 por datos aberrantes. La ubicación y uso del terreno se presentan en el cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Localización de los ensayos de infiltración en LASESA.

Ensayos infiltración nº	Orden de suelo	Coordenadas		UTM Huso	Cultivo
		X (m)	Y (m)		
1,2,3	Aridisol	739.960	4.628.500	30	Rastrojo de Ray-Grass
4,5,6		739.388	4.627.900	30	Alfalfa
7,8	Inceptisol	741.807	4.638.233	30	Alfalfa
9,10,11		741.760	4.638.229	30	Alfalfa
12,13,14	Entisol	740.367	4.639.825	30	Rastrojo de Ray-Grass
15,16,17		739.961	4.639.276	30	Yermo

La medición de la infiltración se ha efectuado mediante el método infitrómetros de doble anillo o de Müntz (Haise et al., 1956; Merrian y Keller, 1978; Bower, 1986). La duración de cada ensayo varió entre las 2,5 y 5,5 horas dependiendo del tiempo hasta estabilizarse la infiltración. Los datos obtenidos de infiltración de cada ensayo, se ajustaron por regresión a la ecuación de Kostiakov (1932):

$$I = k \cdot t^a$$

Donde I es la infiltración acumulada (cm), t es el tiempo de infiltración (min) y k y a son constantes empíricas obtenidas de la regresión.

La infiltración estabilizada (If) se determinó como el valor de infiltración que se produce entre las dos horas de ensayo y el final de éste. Se calculó la media, desviación estándar y coeficiente de variación de la infiltración estabilizada (If) para cada grupo de ensayos pertenecientes a un mismo orden de suelo.

4.1.2.3 Apertura de calicatas y descripción de perfiles

A partir del mapa geomorfológico, con base en criterios propios contrastados con visitas de campo se han identificado una serie de unidades morfoedáficas homogéneas desde el punto de vista hidrológico. En estas unidades, se han abierto 13 calicatas y se han descrito sus perfiles de suelo. Las calicatas se abrieron mediante retroexcavadora hasta rechazo del cazo de la máquina. Su localización se muestra en la figura 4.1. Ocho de las calicatas se realizaron en las terrazas, debido que presentan varios niveles. Las calicatas se describieron de acuerdo con FAO (2006) y SSS (1993). Tras la descripción en campo, se muestrearon los diversos horizontes para su análisis en laboratorio. Simultáneamente, para determinar la densidad aparente (D_a), se extrajeron muestras de suelo inalterado mediante el hincado de cilindros metálicos biselados o anillos de Kopecki. La D_a , relación masa suelo seco/volumen del cilindro se calculó a partir de secado y pesada de estas muestras.

4.1.2.4 Análisis químicos y físicos del suelo

Las muestras de campo se trasladaron a la Escuela Politécnica Superior (EPS) de Huesca. Se secaron al aire, se molieron en un molino de barras y luego se tamizaron con tamiz de 2 mm de luz. Sobre el rechazo, se calculó el porcentaje de elementos gruesos, en función de la relación entre el peso de la tierra fina ($<2\text{mm}$) y de las gravas ($>2\text{mm}$). Los análisis de las muestras se realizaron en los laboratorios de la EPS de Huesca a excepción de la granulometría que se encargó a laboratorios externos. El material se analizó según la metodología de la Comisión de Métodos Oficiales de Análisis y Laboratorios (MAPA, 1982).

El pH se determinó potenciométricamente, con electrodo de vidrio en una suspensión de 1:2,5 de suelo/agua. La salinidad se evaluó midiendo la conductividad eléctrica del extracto 1:5 a 25°C. Los carbonatos totales se midieron volumétricamente en

un calcímetro de Bernard utilizando un ataque ácido de la muestra con HCl 1N y patrón de carbonato cálcico puro.

La textura se determinó por el método de sedimentación discontinua, previa eliminación del contenido orgánico con H₂O₂ y dispersión de las arcillas con hexametáfosfato sódico. El contenido hídrico de punto marchitez permanente (-1,5 MPa) y capacidad de campo (-0,033 MPa) se midió volumétricamente mediante placas extractoras a presión en un equipo de membrana Eijelkamp. A partir de los valores del punto de marchitez permanente (PMP), capacidad de campo (CC), el porcentaje de elementos gruesos (EG), la densidad aparente (Da) y el espesor de cada horizonte (e) se calculó la capacidad de retención de agua disponible (CRAD) de cada perfil, con la siguiente expresión: $CRAD (mm) = ((CC - PMP)/100) \cdot (1 - EG/100) \cdot Da \cdot e$

Los parámetros de CC, PMP y EG se introducen en %, Da en kg/m³ y e en m. La CRAD de cada perfil de suelo, se obtiene como la suma de este parámetro de cada uno de sus horizontes hasta una profundidad de 1,5 m o hasta la presencia de un impedimento físico a la circulación de las raíces (por ejemplo un horizonte petrocálcico, B_{Km}). Esta CRAD se valoró inicialmente de acuerdo a los cinco intervalos: muy baja (<64 mm), baja (64-127 mm), media (128-190 mm), alta (191-250 mm) y muy alta (>250 mm) propuestos por el Servicio de Conservación de Suelos (1983) para los regímenes de humedad del suelo arídicos y xéricos. Sin embargo, y por razones operativas, en el presente trabajo los resultados se han agrupado en tres categorías: muy baja (<64mm), media (64-190mm) y alta (>190mm), para facilitar su uso en gestión de riego. Esta información se ha representado espacialmente mediante un sistema de información geográfica realizado con el programa ArcGis 9.2. Con la misma herramienta se ha realizado un mapa de velocidad de infiltración.

4.1.3 Resultados y discusión

La descriptiva de una parte de los perfiles realizados, denominados Tc Terraza Cruce, Val Lastanosa, Val Cajal, Picardón, Gk, Ladera Almunias altas y Go Ladera Cruz del Serrat, se presentan por su extensión en el anejo nº 1. El resto, perfiles Ta Saso de las Fitass, Tb Saso Pomar, Tc Terraza Cabañera, Td Terraza la Faja, Tg Terraza fluvial, Te Terraza baja la Faja y Tf Terraza baja se han descrito ya en Palacio (2010) y Badía et al. (2010) por lo que se omite su descripción.

4.1.3.1 Infiltración

Los resultados de los 17 ensayos de infiltración se presentan agrupados por orden de suelo, utilizando la información de la descriptiva de perfiles y la analítica de suelos.

Como se ha señalado los parámetros de interés son la velocidad de infiltración (i) y la infiltración acumulada (I). A partir de los datos de campo también se determinan los coeficientes que definen sus respectivas ecuaciones y la infiltración estabilizada (If) que se presentan en las figuras 4.2 a 4.4.

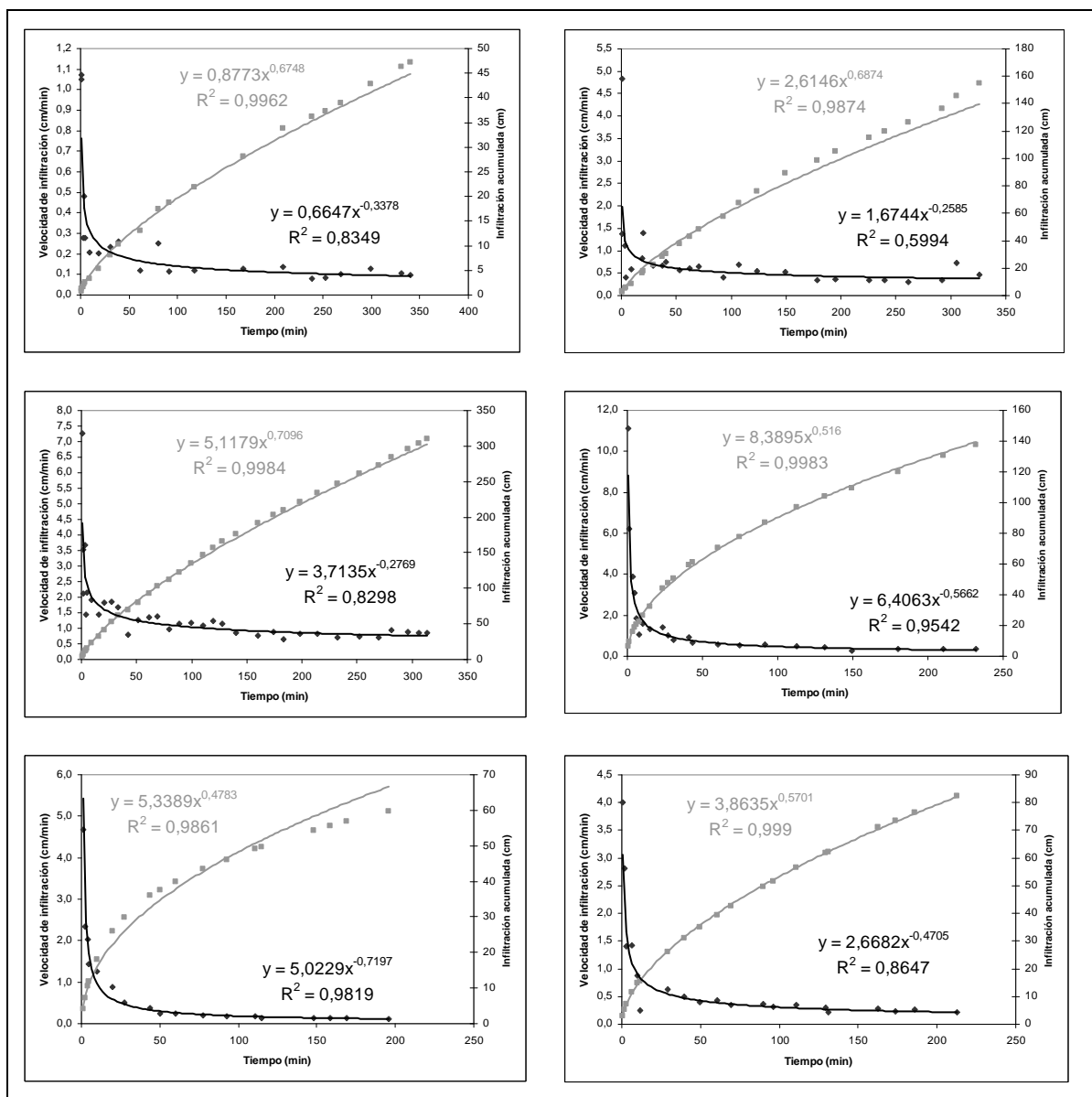


Figura 4.2. Curvas de velocidad de infiltración (negro), e infiltración acumulada (gris), en los suelos del orden Aridisol.

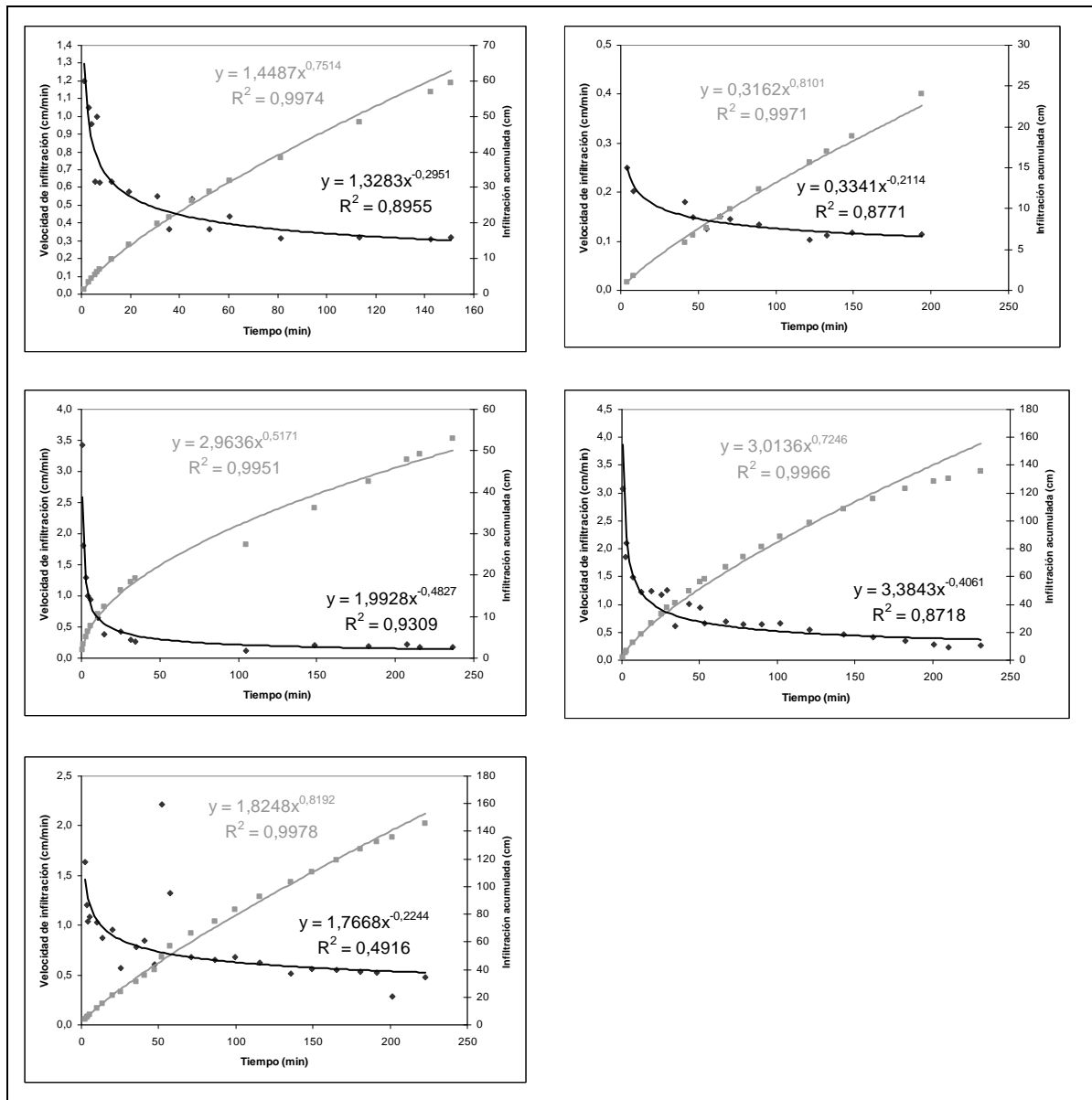


Figura 4.3. Curvas de velocidad de infiltración (negro), e infiltración acumulada (gris), en los suelos del orden Inceptisol.

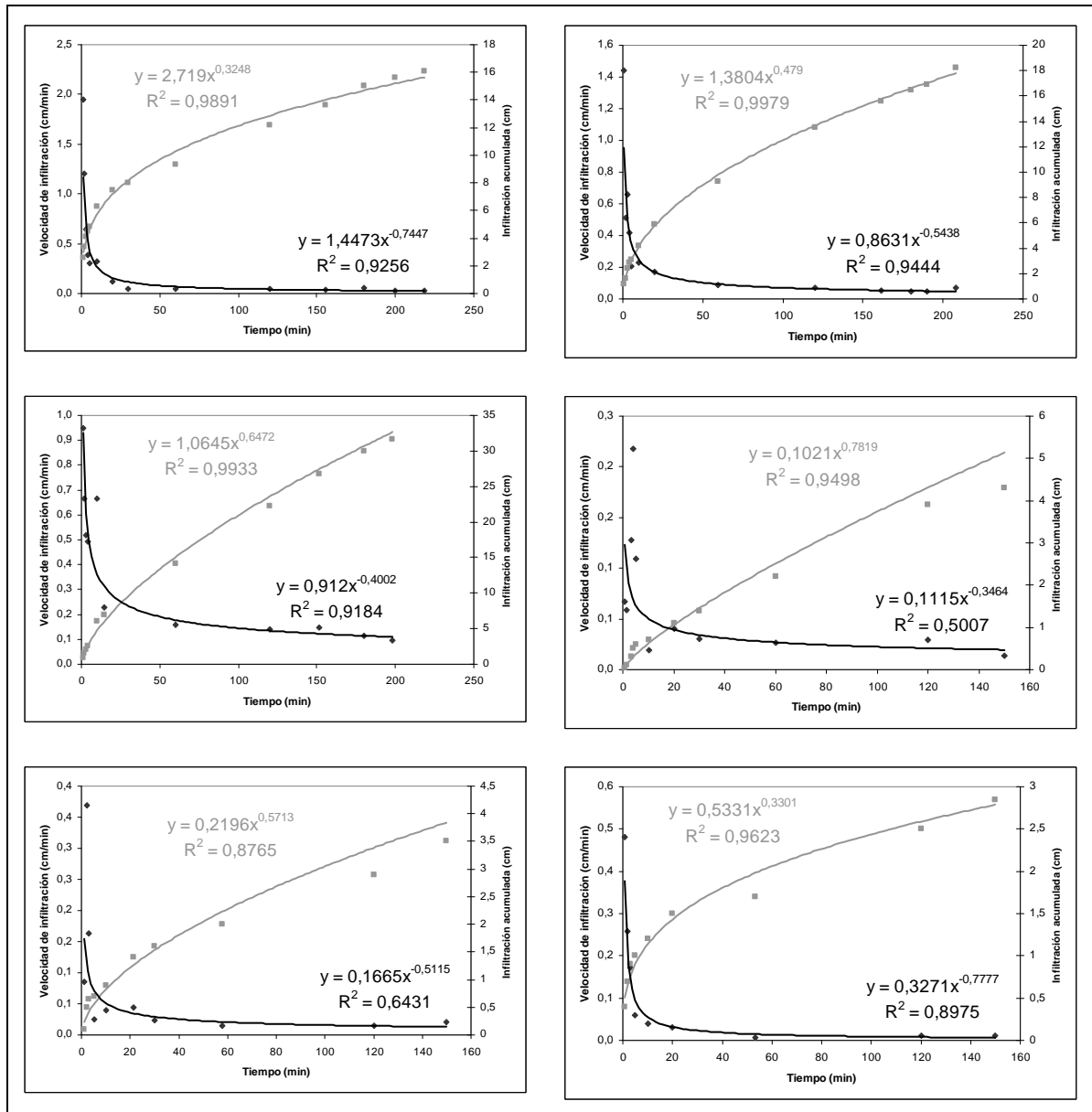


Figura 4.4. Curvas de velocidad de infiltración (negro), e infiltración acumulada (gris), en los suelos del orden Entisol.

Los resultados de velocidad de infiltración estabilizada (I_f) se muestran en el cuadro 4.2. También se presentan el ajuste de los datos de campo a los coeficientes de la ecuación de Kostiakov (k y a), obtenidos en cada una de las mediciones agrupadas por tipo de suelo.

El análisis de las velocidades estabilizadas (I_f) de cada tipo de suelo muestra una clara variabilidad, similar a la obtenida en suelos del valle del Ebro por Playán et al. (2000), Zapata y Playán (2000) y Lecina et al. (2005). Como era esperable, en los suelos sobre gravas, sasos, terrazas y laderas (orden Aridisoles e Inceptisol), la I_f es muy alta, con valores medios similares, en torno a los $0,31 \text{ cm min}^{-1}$. Por esta razón, a efectos prácticos, se agrupan. Por el contrario en los suelos de vales y terciario (Entisoles), la I_f media es casi diez veces menor (figura 4.5). Estos son similares a los obtenidos por RENASA (1975) en la vecina comunidad de regantes “Miguel Servet” sobre suelos con las mismas características.

El cuadro 4.2 muestra los coeficientes que definen las ecuaciones de infiltración acumulada (I) en cada una de las mediciones (k , a).

Cuadro 4.2. *Velocidades de infiltración estabilizada (I_f), coeficiente de variación (CV) y coeficientes de las ecuaciones de infiltración acumulada (k , a) según ensayo y tipo de suelo.*

Orden de suelo	Ensayo n°	If			I	
		If (cm min ⁻¹)	media (cm min ⁻¹)	CV (%)	k (m·min ^{-a})	a
Aridisol	1	0,11	0,33	75	0,009	0,675
	2	0,39			0,026	0,687
	3	0,79			0,051	0,710
	4	0,34			0,084	0,516
	5	0,12			0,053	0,478
	6	0,25			0,039	0,570
Inceptisol	7	0,30	0,29	50	0,014	0,751
	8	0,11			0,003	0,810
	9	0,19			0,030	0,517
	10	0,34			0,030	0,725
	11	0,49			0,018	0,819
Entisol	12	0,04	0,04	96	0,027	0,325
	13	0,05			0,014	0,479
	14	0,12			0,011	0,647
	15	0,01			0,001	0,782
	16	0,02			0,002	0,571
	17	0,01			0,005	0,330

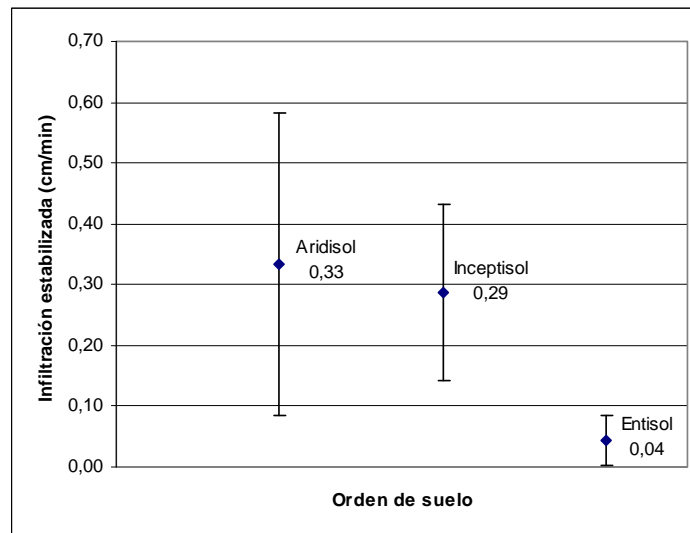


Figura 4. 5. *Velocidad de infiltración media y desviación estándar de cada tipo de suelo.*

Los valores obtenidos de k y a son más altos que los presentados por Zapata y Playán (2000), Playán et al. (2000) y Lecina et al. (2005). Hay que reseñar que sólo en el primer trabajo se ha empleado el método de los anillos. En los mencionados trabajos, los valores de CV son altos, en la misma línea de lo observado en el presente estudio, en los trabajos fin de carrera realizados por Roca (1995), Barcos (1998), Ara y Monge (1999), Alfaro y Muñoz (2001) y durante numerosas prácticas en la EPS de Huesca.

Con los datos obtenidos se ha realizado una primera zonificación espacial de I_f que se muestra en la figura 4.6. En esta, el 62% de la superficie de LASESA tiene unos valores de velocidad de infiltración estabilizada muy altos, del orden de 4 metros por día, evidentemente superiores a los valores de precipitación que se obtienen por el método de DGC (1999), incluso para periodos de retornos más altos. Lo mismo sucede con la pluviometría de los aspersores, aspecto que se presenta en el próximo capítulo. En el resto de la superficie, el suelo poco profundo se sitúa sobre el material terciario. Estos tienen un valor de I_f que es la décima parte de lo que presentan los suelos sobre gravas. Este valor también es superior a la pluviometría del riego por aspersión. La diferencia entre los suelos de terrazas, terciario y vales es similar a lo que observan Lecina et al. (2005), en suelos de plataformas (sasos) y aluviales finos en la Comunidad V de Bardenas.

Para lluvias normales, con bajos periodos de retorno, tampoco se produciría encharcamiento ni escorrentía salvo en el caso de tormentas de intensidades superiores a

30 mm h⁻¹. En general, salvo lluvias muy intensas, sobre materiales de terciarios, en los suelos de LASESA no se deberían producir problemas de encharcamiento ni escorrentía.

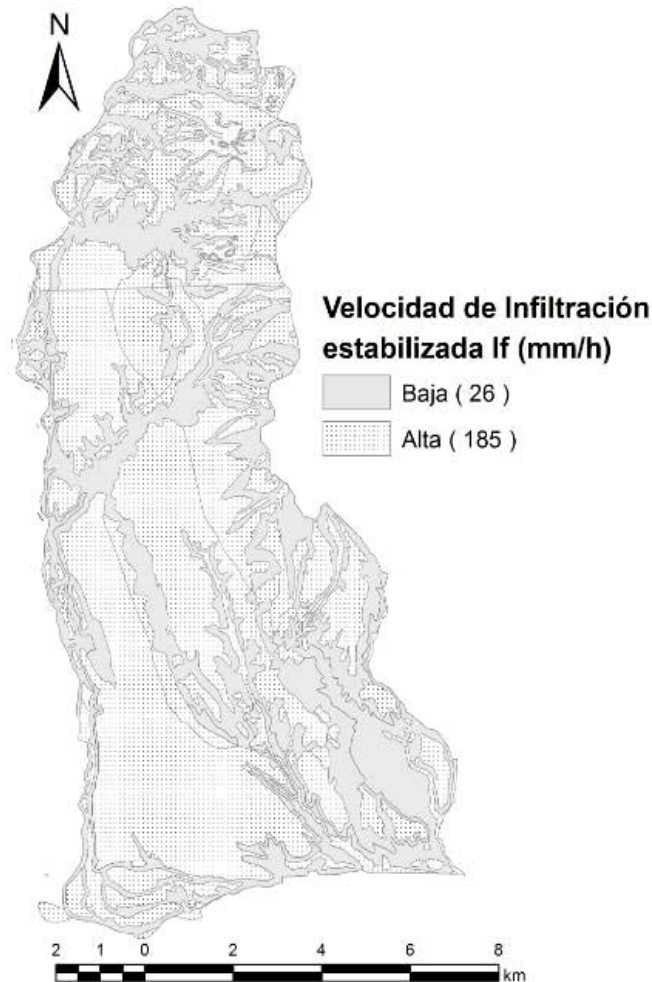


Figura 4.6. *Mapa de distribución de la velocidad de infiltración en LASESA.*

La velocidad de infiltración estabilizada I_f se asemeja al valor de conductividad hidráulica vertical (K_v). Este valor es ligeramente menor debido a que en I_f se suman los efectos del potencial mátrico y la difusión lateral.

La evolución de la infiltración acumulada de cada tipo de suelo, se presenta en una gráfica con el conjunto de las curvas de I de cada ensayo y diferenciadas por tipo de suelo (figura 4.7). Existen también dos grupos de suelos en lo relativo de infiltración acumulada que se solapan ligeramente. El primero formado por los suelos de saso, terraza y ladera

(Aridisoles y Inceptisoles), donde la infiltración acumulada media a las 2,5 horas se sitúa en torno a los 800 L m^{-2} . En el segundo, formado por las vales y terciario (Entisoles), la infiltración acumulada es mucho menor y se sitúa en torno a los 110 L m^{-2} .

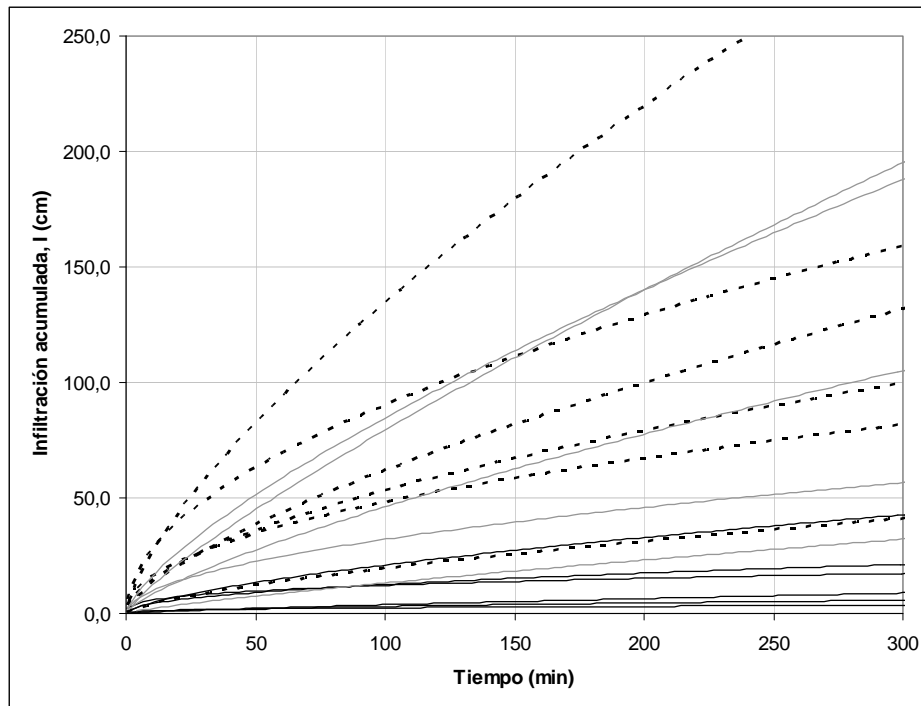


Figura 4.7. Curvas de evolución de la infiltración acumulada de cada tipo de suelo, Aridisol (línea discontinua), Inceptisol (línea continua gris) Entisol (línea continua).

4.1.3.2 Propiedades morfológicas del suelo

La mayoría de los horizontes superficiales de los suelos sobre materiales del Terciario, presentan en superficie un color amarillo pálido tipo 10 YR. Lo mismo sucede con las terrazas más recientes. Por el contrario en los suelos más viejos, el proceso de rubefacción ha incrementado los óxidos de hierro como constatan los tonos más rojizos (7,5 YR) de los sasos y laderas. Los horizontes cálcicos, y aún más los petrocálcicos, muestran un brillo alto y un croma bajo, debido al alto contenido de carbonatos que, en estado puro, es de color blanco (Palacio, 2010). El desarrollo estructural en los horizontes superficiales es fuerte en todos los suelos a excepción del subgrupo de los Typic Xerofluvent. La estructura dominante son bloques subangulares. El grado de estructuración disminuye con la profundidad e incluso llega a desaparecer por presencia de horizontes petrocálcicos o texturas arenosas. Todos los horizontes superficiales presentan una compactidad baja que aumenta con la profundidad, a excepción de la terraza fluvial en la que sus últimos horizontes tienen textura franco-arenosa. En los horizontes petrocálcicos la

compacidad es extrema, debido a la cementación de la matriz por el carbonato cálcico. Ello supone que este horizonte sea impermeable al agua y al paso del sistema radicular. En cambio, los horizontes arenosos muestran una compacidad muy baja o nula debido a la propia naturaleza de la fracción arena (Badía et al., 2010).

4.1.3.3 Resultados analíticos

Las diversas características de los suelos como profundidad, drenaje, textura, pedregosidad, pendiente, capacidad de retención de agua disponible (CRAD), presencia de carbonato cálcico, pH y salinidad se han interpretado siguiendo los criterios que aparecen en diversos textos de referencia en clasificación de suelos (SCS, 1983; SSS, 1993; Porta, 1983; Herrero et al., 1993; Porta et al., 1999). Los resultados analíticos de las propiedades químicas de los perfiles estudiados se presentan en el cuadro 4.3, 4.4 y 4.5.

El pH medio es de 8,4 y oscila entre 7,6 y 9. En general los suelos tienen un pH moderadamente básico relacionado con la presencia de carbonato cálcico. Sin embargo en horizontes profundos del perfil terraza baja “La Faja” (Te) hay valores próximos a 9. Esto se puede interpretar como presencia de problemas de sodicidad, algo que es inusual en suelos sobre una terraza, por lo que se requeriría un estudio específico.

El valor medio de CE 1:5 es de $0,21 \text{ dS m}^{-1}$ y en la mayoría de los suelos analizados es menor a $0,3 \text{ dS m}^{-1}$ por lo que se clasifican como suelos no salinos. Los valores más altos de conductividad eléctrica (CE) aparecen en superficie, normal en periodos secos. La excepción se presenta en el perfil de Val Cajal con un valor de $1,3 \text{ dS m}^{-1}$. Este perfil se sitúa en el límite con el sector XXIII de la comunidad de regantes de Villanueva de Sigena, donde la salinidad supone un problema grave, tal como indica RENASA (1975). En LASESA este tipo de suelos representa menos del 5% de la superficie por lo que se ha decidido no estudiarlos en detalle.

Todas las muestras presentan un contenido medio-alto de carbonato cálcico. En los perfiles sobre terrazas antiguas, el valor aumenta en profundidad. En los más viejos, desarrollados sobre las terrazas superiores y sasos, se han formado endopediones petrocálcicos, “mallacán”, a poca profundidad. Los desarrollados sobre las terrazas intermedias presentan una incipiente acumulación de carbonatos secundarios, en forma de cemento geopetal. El grosor de este horizonte petrocálcico aumenta con la antigüedad de la

terrazza (Badía et al., 2009 y 2010). Los suelos de terrazas se han desarrollado sobre los depósitos fluviales, formados por pasadas alternas de arenas y gravas calizas, con matriz limo-arenosa, no presentan claros síntomas de transporte de caliza.

La clase textural, granulometría y porcentaje de elementos gruesos de los horizontes analizados se muestran en los cuadros 4.3, 4.4 y 4.5. La mayoría las texturas tipo franco. En las terrazas se presentan heterogeneidades relacionadas con la sedimentación fluvial. De hecho, en capas profundas de las terrazas pueden encontrarse horizontes arenosos, heredados de su génesis fluvial. Los suelos sobre materiales terciarios tienen un mayor contenido en limos, procedentes de las lutitas parentales. En las terrazas, las piedras o elementos gruesos (EG) aumentan, en general, con la profundidad pero su presencia depende de los diferentes aportes de gravas y cantos que ha aportado el río. Los elementos gruesos tienen un tamaño de grava fina a gruesa (0,2 a 6 cm), forma redondeada con orientación irregular en superficie y horizontal u oblicua en profundidad, rasgos característicos de los depósitos fluviales. Son frecuentes las discontinuidades con cambios texturales y variaciones en el contenido en piedras. La media de la densidad aparente (D_a) de 15 muestras de suelo inalteradas es $1,49 \text{ kg m}^{-3}$. Es un valor que se puede considerar medio-alto, por la presencia de piedras.

Los resultados de la capacidad de retención de agua de cada horizonte se muestran también en los cuadros 4.3, 4.4 y 4.5, donde a partir de CC, PMP, EG, profundidad y densidad aparente del suelo se ha determinado la CRAD de los perfiles estudiados por horizontes. En los perfiles estudiados la CRAD depende de la textura del suelo y sobre todo de la cantidad de elementos gruesos y profundidad efectiva del perfil, al igual de lo que encuentra Lecina et al. (2005). En los suelos de saso y terrazas altas (subgrupo Calcicid Petrocalcicid), la CRAD está afectada por la presencia de un horizonte petrocálcico que limita la profundidad del perfil. La CRAD asignada a cada unidad de suelo se calcula como la media de la CRAD de los perfiles que incluye.

Cuadro 4.3. Resultados analíticos de los perfiles pertenecientes al subgrupo de suelos Calcic Petrocalcicid.

Subgr.	Perfil	Horizonte	pH	CE (1:5) (dS m ⁻¹)	CaCO ₃ %	Clase Textural USDA	Arena %	Limo Grueso %	Limo Fino %	Arcilla %	EG %	CC %	PMP %	CRAD horizonte (mm)	CRAD perfil (mm)	CRAD media (mm)
Calcic Petrocalcicid	Ta Saso de las Fitas	Ah	8,1		9,4	Franca	40,6	11,5	27,1	20,8	25	21,5	11,7	22,1	22	22
		Bkm1			87,7											
		Bkm2			83,7											
		Bkc			48,8	Franco-limosa	13,8	16	46,3	23,9						
		Btkc			40,8	Franco-arcillo-limosa	10,4	11,1	50,6	28						
		BtC			39,5	Franco-limosa	5,7	9,4	53,5	31,5						
		Ckc			46,1	Franco-limosa	23,5	18,8	37,8	20						
		C			46,5	Franco-limosa	15,8	11	47,5	25,7						
		2C			47	Franco-arenosa	22	14,2	41,6	22,2						
		3C			38,8	Arenosa	65,4	12,8	12,7	9,1						
		4C			11,7											
	Tb Saso Pomar	Ah 0-30	8,46	0,2	19,9	Franco-arcillo-arenosa	54,3	10,5	14,1	21,1	49	16,6	9,5	16,4	25	25
		Bw 30-60	8,3	0,18	23,4	Franca	49,8	11,2	23,1	15,9	76	17,9	10,3	8,1		
		Bkm 60-90	8,37		58,8											
		Ckm 90-	8,37		29,8											
	Tc Terraza Cabañera	Ah 0-30	8,34	0,32	26,8	Franca	45,1	11,8	18,1	25	10	20,5	10,2	41,4	41	32
		Bkm1 30-80	8,54		73											
		Bkm2 80-110	8,57		72,1											
		Ck 110-150	8,64	0,16	54,9											
		C 150-190	8,67	0,11	52,5											
		2C >190	8,63	0,09	26,2											
	Tc Terraza Cruce	Ap 0-35	8,28	0,08	20,5	Franco-arcillosa	35	13,2	20,63	31,17	52	19,3	10,3	22,4	22	
		Bkm 35-70	8,3	0,08	48,9											
		Ck 70-130	8,53	0,04	32,5	Arenosa-franca	78,34	6,01	10,4	5,25						
		2Ck >200	8,12	0,06	40,6	Franco-limosa	3,7	12,8	64,1	19,4						
	Td Terraza la Faja	Ap 0-40	8,27	0,21	16,7	Franca	36,7	16,6	21,9	24,8	38	20,9	11,6	34,7	35	35
		Bkm 40-85	8,46		67,8											
		Ckm >140	8,55		53,3											

Cuadro 4.4. Resultados analíticos de los perfiles pertenecientes a los subgrupos de suelos *Typic Xerofluvent* y *Typic Xerorthent*.

Subgr.	Perfil	Horizonte	pH	CE (1:5) (dS/m)	CaCO3 %	Clase Textural USDA	Arena %	Limo Grueso %	Limo Fino %	Arcilla %	EG %	CC %	PMP %	CRAD horizonte (mm)	CRAD perfil (mm)	CRAD media (mm)
Typic Xerofluvent	Val Lastanosa	Ah 0-30	8,31	0,1	24,6	Franca	28	11	37	24	3	23,4	8,4	65,4	264	264
		C 30-80	8,3	0,11	24,5	Franco-limosa	27	14	36	22	6	19,5	6,3	91,5		
		2C 80-135	8,54	0,14	22,6						2	15,3	5,9	75,3		
		3Ck 135-170	8,61	0,3	22,9	Franco-arcillosa	21	14	32	33	0	23,9	9,7	73,7		
	Tg Terraza fluvial	Ap1 0-20	8,24	0,21	30,8	Franco-limosa	28,4	24,8	28,8	18	0	21,3	9,9	33,9	223	223
		Ap2 20-40	8,3	0,21	30,9	Franco-limosa	27,8	24,7	29,6	17,9	0	20,7	7,4	39,8		
		AC 40-70	8,24	0,19	28,5	Franca	34,2	19,1	26,7	20	13	18,8	11,2	29,2		
		C1 70-100	8,2	0,23	33,2	Franco-limosa	33,9	21,8	28,2	16,1	0	16,7	5,6	49,2		
		C2 100-130	8,3	0,15	35	Franco-arenosa	57,1	16,3	16,8	9,8	0	15,1	4,2	48,9		
		C3 130-150	8,29	0,14	33,7	Franco-arenosa	68,5	14,1	11,5	5,9	0	11,4	4,2	21,5		
Typic Xerorthent	Val Cajal	Ap 0-25	7,68	1,33	33	Franco-limosa	19	18	43	20	5	24,4	8,3	57,3	131	131
		AC 25-50	7,9	0,89	29,6						46	16,9	5,9	21,8		
		C 50-70	8,81	0,41	26,9	Franco-arenosa	56	5	20	19	86	12	4,1	3,3		
		2C 70-100	8,19	0,97	23	Arcillo-limosa	2	3	46	50	0	26,1	15,3	48,2		
	Picardón	Ap 0-20	8,45	0,05	22,6	Franca	44	13	24	19	5					
		A/C 20-45	8,55	0,05	24,1						7					
		C1 45-55	8,65	0,05	25,9	Franco-limosa	45	23	21	11	0					
		C2 55-75	8,61	0,06	31,6	Franco-limosa	4	17	58	21	0					
		C3 75-100	8,48	0,22	35,3						0					

Cuadro 4.5. Resultados analíticos de los perfiles pertenecientes al subgrupo de suelos *Typic Calcixerept*.

Subgr.	Perfil	Horizonte	pH	CE (1:5) (dS/m)	CaCO ₃ %	Clase Textural USDA	Arena %	Limo Grueso %	Limo Fino %	Arcilla %	EG %	CC %	PMP %	CRAD horizonte (mm)	CRAD perfil (mm)	CRAD media (mm)
Typic Calcixerept	Gk Ladera Almunias altas	Ap1 0-10	7,61	0,29	25,3	Franco-arcillosa	39,51	10,1	21,86	28,53	34	22,4	10,8	11,5	201	174
		Ap2 10-40/50	8,19	0,11	22,4						37	19,5	10,6	29,2		
		Bwk1 40/50- 80/100	8,42	0,07	46,2						37	16,7	5,5	47,1		
		Bwk2 80/100-110	8,28	0,07	37,4	Franco-arenosa	52,96	6,9	22,16	17,98	53	14,4	5,5	12,6		
		Ck 110-140	8,02	0,11	34,9						0	28,5	7,6	93,7		
		2C 140-200	8,06	0,09	24,8	Franco-arenosa	53,77	11,05	16,96	18,22	43	12,7	4,4	42,2		
	Go Ladera Cruz del Serrat	Ap1 0-20	8,13	0,08	25,3	Franco-arcillosa	36	10	24	29	21	18,7	6,5	29	146	
		Ap2 20-40	8,34	0,07	22,7						23	16	8,9	16,3		
		Bwk 40-75	8,46	0,05	57,7	Franco-arcillosa	22	6	44	27	4	20,4	7,9	62,6		
		Bk1 75-110	8,44	0,05	57,1						49	18,5	10,3	22		
		Bk2 110-130	8,5	0,04	51,1						50	15,9	5,2	15,9		
		C >130	8,45	0,04	28,9	Franco-arenosa	60	10	20	11	0					
	Te Terraza baja la Faja	Ap1 0-20	8,41	0,23	21,5	Franca	51,1	13,1	15,1	20,7	22	15,6	8,2	17,2	76	76
		Ap2 20-40	8,68	0,16	24,1	Franca-arenosa	53,6	13,3	15,7	17,4	21	15,1	4,5	25,1		
		Bk 40-60	8,9	0,12	33,1	Franco-arenosa	66	5,6	13,2	15,2	5	11,3	4,9	18		
		2CK1 60-90	8,87	0,1	26,8	Arenosa	88,7	2,8	2	6,5	81	5,4	1,5	3,4		
		2CK2 90-130	9,02	0,08	25,5	Arenosa	96,4	0,3	0	3,3	68	3,4	0,8	5		
		3C 130-160	8,93	0,08	25,9	Arenosa	98,2	0	0	1,8	0	3,5	1	11,4		
	Tf Terraza baja	Ap 0-30	8,16	0,28	26,3	Franco-arcillosa	28,8	22,1	18,9	30,2	4	21,9	12,4	40,9	145	145
		Bw1 30-55	8,19	0,31	25,9	Franca	33,4	20,3	24,2	22,1	2	18	10,9	26,3		
		Bw2 55-80	8,25	0,29	27,5	Franca	35,6	18,4	23	23	3	18,7	10,7	28,9		
		2Ck 80-105	8,21	0,28	31,8	Franca	40	12,3	21,3	26,4	70	17,9	10,1	8,6		
		3Cg 105-125	8,16	0,38	42,2	Franca	45	16,4	21	17,6	15	19	4,1	37,6		
		4C >170	8,37	0,16	19,3	Arenosa	94,8	1	0,8	3,4	70	4	1,3	5,3		

Los suelos se ordenan siguiendo el criterio propuesto por el SCS (1983) para evaluar la CRAD, agrupándolos en sus cinco tipos característicos (Cuadro 4.6).

Cuadro 4.6. *Perfiles descritos en LASESA ordenados por CRAD.*

CRAD				PERFIL nombre	Clasificación Soil Taxonomy Subgrupo
Intervalo (mm/1,5 m)	Valoración	Superficie (%)	Perfil (mm)		
<64	Muy baja	34	22	Ta Saso de las Fitas	Calcic Petrocalcicid
			22	Tc Terraza alta Cruce	Calcic Petrocalcicid
			25	Tb Saso Pomar	Calcic Petrocalcicid
			35	Td Terraza alta la Faja	Calcic Petrocalcicid
			41	Tc Terraza alta Cabañera	Calcic Petrocalcicid
64-127	Baja	2	76	Te Terraza baja la Faja	Typic Calcixerept
128-190	Moderada	45	131	Val Cajal	Typic Xerorthent
				Picardón	Typic Xerorthent
			145	Tf Terraza baja	Typic Calcixerept
			146	Go Ladera	Typic Calcixerept
191-250	Alta	13	201	Gk Ladera Almunias altas	Typic Calcixerept
			223	Tg Terraza baja	Typic Xerofluvent
>250	Muy alta	7	264	Val Lastanosa	Typic Xerofluvent

A efectos prácticos las cinco tipos característicos SCS (1983) se han agrupado en tres categorías: muy baja, baja-media y alta-muy alta. Estos resultados se incorporaron, en el mapa digital de suelos en una capa discreta de información que se muestra en la figura 4.8. Esta información es útil para optimizar el riego por parcela.

Se observa que el 34% de la superficie de LASESA tiene una CRAD "muy baja". Son suelos que se sitúan sobre las terrazas más antiguas que han sufrido procesos de cementación dando lugar a endopediones petrocálcicos o mallacán a poca profundidad (Badía, 2010). Esto induce una muy baja CRAD. Para conseguir una buena eficiencia de riego en estos suelos hay que tener en cuenta su poca capacidad de almacenamiento de agua. Por tanto requieren una frecuencia alta de riego con un bajo caudal para no superar el valor de la CRAD. El 45% de la superficie tiene una CRAD "moderada" donde la frecuencia de riego puede ser menor, con una mayor dosis de agua. En el resto permite frecuencias aun menores.

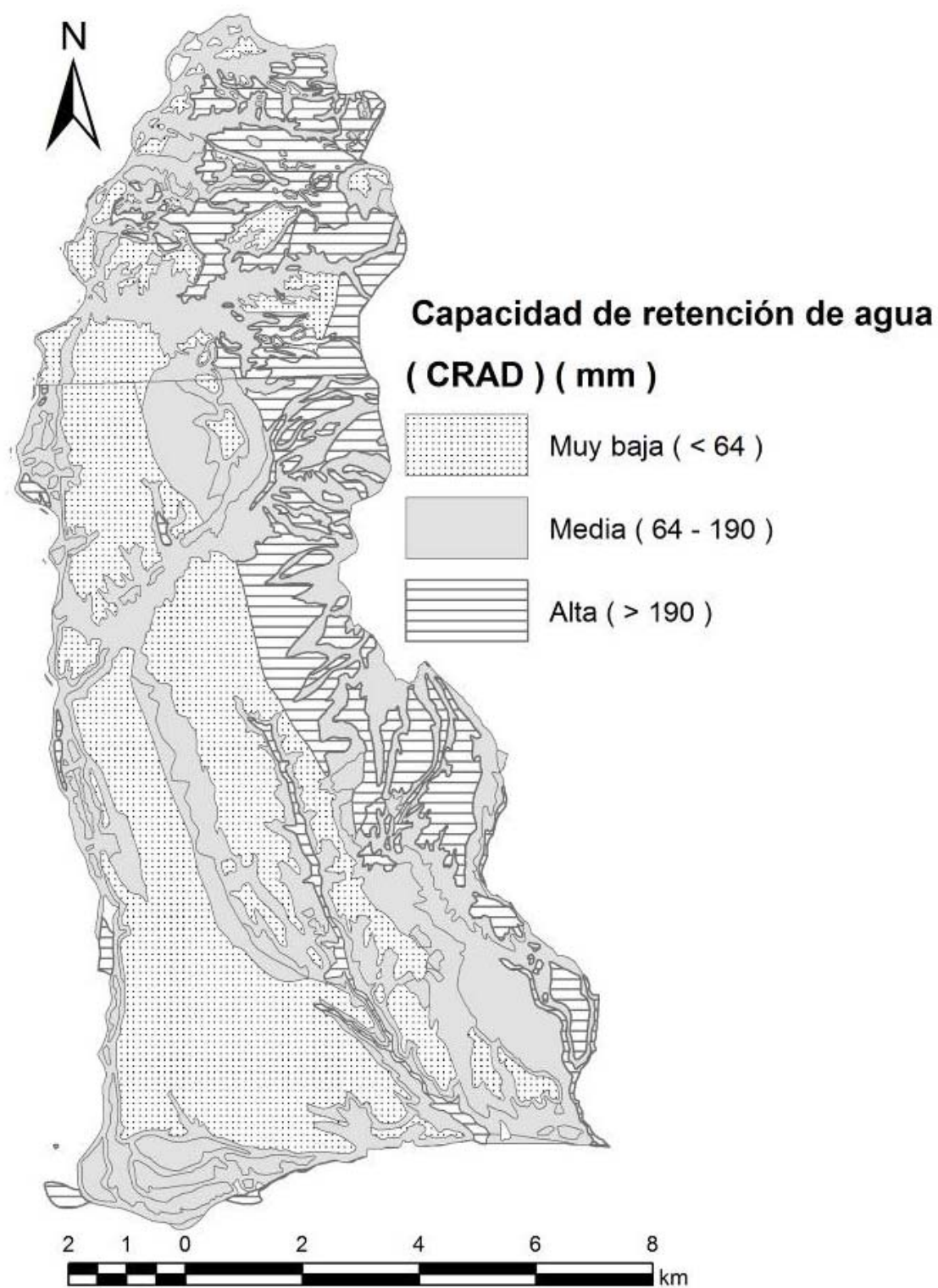


Figura 4.8. Mapa de distribución de intervalos de CRAD en LASESA

Se ha realizado una comparación entre los valores obtenidos y los estimados a partir de la textura como proponen Israelsen y Hansen (1962) y utilizan Herrero et al. (2007). La comparación gráfica, pone de manifiesto una sobrestimación próxima al 50%, de los teóricos sobre los observados (Figura 4.9).

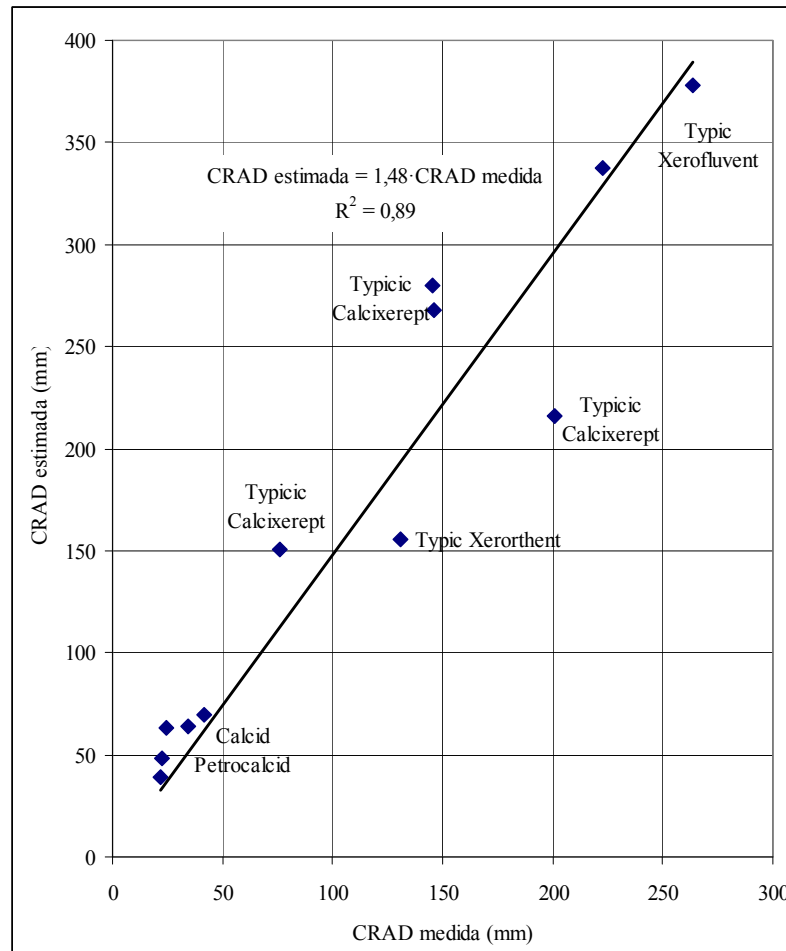


Figura 4.9. Comparación de valores de CRAD, medidos y estimados por textura, en LASESA.

4.1.3.4 Subgrupos de suelos

A partir de las descriptivas de perfiles y los datos analíticos se ha subdividido LASESA se ha subdividido en cuatro unidades morfoedáficas o subgrupos de suelos, cuyas características generales se describen a continuación.

4.1.3.4.1 Sasos y Terrazas (*Calcic Petrocalcic*)

Los suelos de los sasos y terrazas se clasifican dentro del subgrupo Calcic Petrocalcic según Soil Taxonomy (SSS, 2010). Estos suelos son poco profundos, bien drenados, de textura media a moderadamente fina y con abundantes elementos gruesos. Su capacidad de retención de agua disponible es muy baja. Situado en las plataformas llanas (<1%) culminadas por depósitos del Pleistoceno. Los suelos de saso se han desarrollado sobre pasadas alternas de arenas y gravas arrastradas desde el Prepirineo por corrientes temporales en el caso de los sasos y por el río Alcanadre en el caso de las terrazas altas. En ambos casos han sufrido procesos de cementación dando lugar a endopediones petrocálcicos. Los suelos de saso ocupan las plataformas detríticas de mayor cota de la zona, situadas a lo largo de la franja noreste que delimita el área de estudio. Estos suelos presentan, en todo el perfil frecuentes acumulaciones de carbonato cálcico en forma fundamentalmente de cemento geopetal. La secuencia típica de horizontes es Ah/Ap – Bkm – Ck(m). El horizonte superficial (Ah/Ap) tiene un espesor de 30-40 cm. Su textura es franca, franco-arcillosa o franco-arcillo-arenosa, con abundantes elementos gruesos. El pH es moderadamente básico y el contenido de carbonato cálcico es medio. El horizonte subsuperficial está compuesto por gravas cementadas (Bkm) dando lugar a un endopedión petrocálcico de entre 30-80 cm de espesor. Por debajo aparece una pasada de arenas sueltas (Ck) o cementadas (Ckm). Los perfiles que representan esta unidad son: Ta Saso de las Fitás, Tb Saso Pomar, Tc Terraza Cabañera, Tc Terraza Cruce y Td Terraza la Faja.

4.1.3.4.2 Vales y terrazas fluviales (*Typic Xerofluvent*)

Los suelos de las vales y las terrazas fluviales se clasifican dentro del subgrupo Typic Xerofluvent según Soil Taxonomy (SSS, 2010). Estos suelos son muy profundos, bien drenados, de textura media en el primer metro. Tiene pocos o muy pocos elementos gruesos a excepción de algún subhorizonte de grava que los tiene frecuentes. Su capacidad de retención de agua disponible es alta. Situados en las vales y en las terrazas más recientes. Se trata de suelos jóvenes desarrollados en los barrancos rellenos de sedimentos y en las terrazas de menor cota del río Alcanadre. En consecuencia, y en cuanto a los procesos edáficos, no presentan endopediones diagnóstico. La secuencia típica de horizontes es Ap – (AC) – C – 2C – 3C(k). El horizonte superficial (Ah/Ap) tiene un espesor de 30-40 cm. Su

textura es franca o franco-limosa, con pocos o ningún elemento grueso. El pH es moderadamente básico y el contenido de carbonato cálcico es alto o moderadamente alto. El horizonte subsuperficial tiene textura media y frecuentes elementos gruesos. El pH es moderadamente básico y el contenido de carbonato cálcico es moderadamente alto. Los siguientes horizontes (C) vuelven a tener pocos o muy pocos elementos gruesos y su textura es moderadamente fina en el caso de los rellenos de vales y moderadamente gruesa en el caso de las terrazas recientes del río Alcanadre. Los perfiles que representan esta unidad son Val Lastanosa y Tg Terraza fluvial.

4.1.3.4.3 Terciario (*Typic Xerorthent*)

Los suelos situados directamente sobre el material Terciario se clasifican dentro del subgrupo *Typic Xerorthent* según Soil Taxonomy (SSS, 2010). Estos suelos son moderadamente profundos, bien drenados, y de textura media. Tiene pocos elementos gruesos en el horizonte superficial. Su capacidad de retención de agua disponible es moderada. Aparece generalmente en vertientes con pendiente variable desde suaves a fuertes (2-15%). Se caracterizan por la presencia de la lutita a un metro de profundidad. La secuencia típica de horizontes es Ap – AC – C1 – C2 – C3. El horizonte superficial (Ap) tiene un espesor de 20-25 cm. Su textura es franca o franco-limosa, con pocos elementos gruesos. El pH es medianamente o moderadamente básico y el contenido de carbonato cálcico es alto o moderadamente alto. El horizonte subsuperficial (AC) tiene 25 cm de espesor y es muy variable en cuanto a la presencia de elementos gruesos que van de abundantes a frecuentes. El pH es ligeramente alcalino o moderadamente básico y el contenido de carbonato cálcico es alto o moderadamente alto. Los horizontes inferiores (C) provienen de la alteración de la lutita subyacente. Los perfiles que representan esta unidad son Val Cajal y Picardón.

4.1.3.4.4 Laderas y terrazas bajas (*Typic Calcixerept*)

Los suelos de las laderas y terrazas bajas se clasifican dentro del subgrupo *Typic Calcixerept* según Soil Taxonomy (SSS, 2010). Estos suelos son profundos y bien drenados. En las laderas la textura es moderadamente fina en los horizontes superiores y moderadamente gruesa en los inferiores, los elementos gruesos también aumentan con la

profundidad con la excepción de algunas pasadas de arenas (horizonte C) que no tiene ningún elemento grueso. En las terrazas bajas la textura es más gruesa que en las laderas, pero también sigue el mismo patrón aumentando su grosor y presencia de elementos gruesos conforme aumenta la profundidad. Su capacidad de retención de agua disponible media es moderada. Los suelos de ladera conectan los distintos niveles de terraza y se desarrollan a partir de la erosión de estas. Los suelos de las terrazas bajas se sitúan cercanos al río en las plataformas casi llanas (2%) culminadas por depósitos del Pleistoceno Superior, a 30 o 10 metros sobre el nivel del río. Estos suelos se han desarrollado sobre pasadas alternas de arenas y gravas procedentes del río Alcanadre. Presentan, en todo el perfil, frecuentes acumulaciones de carbonato cálcico en forma fundamentalmente de cemento geopetal. La secuencia típica de horizontes es Ap – Bwk – (Bk) – C(k). El horizonte superficial (Ap) presenta típicamente textura franco-arcillosa con elementos gruesos muy frecuentes y tiene un espesor de 30-40 cm. El pH es moderadamente básico y el contenido en carbonato cálcico es moderadamente alto. El horizonte subsuperficial (Bwk) tiene texturas franco-arcillosas y francas y llega hasta los 75-90 cm de profundidad. Por debajo aparecen arenas sueltas (C) que pueden tener o no presencia de elementos gruesos. Los perfiles que representan esta unidad son: Gk Ladera Almunias altas, Go Ladera Cruz del Serrat, Te Terraza baja la Faja y Tf Terraza baja.

El cuadro 4.7 muestra la clasificación propuesta para los 13 perfiles estudiados según Soil Taxonomy (SSS, 2010).

Cuadro 4.7. Clasificación de los suelos de LASESA según Soil Taxonomy (SSS, 2010).

Orden	Suborden	Gran Grupo	Subgrupo	Perfil
Aridisoles	Calcids	Petrocalcids	Calcic Petrocalcic	Ta Saso de las Fitas
				Tb Saso Pomar
				Tc Terraza Cabañera
				Tc Terraza Cruce
				Td Terraza la Faja
Entisoles	Fluents	Xerofluents	Typic Xerofluvent	Val Lastanosa
				Tg Terraza fluvial
	Orthents	Xerorthents	Typic Xerorthent	Val Cajal
				Picardón
Inceptisoles	Xerepts	Calcixerpts	Typic Calcixerpt	Gk Ladera Almunias altas
				Go Ladera Cruz del Serrat
				Te Terraza baja la Faja
				Tf Terraza baja

En síntesis, se han identificado cuatro subgrupos de suelos, Calcic Petrocalcid, Typic Xerofluvent, Typic Xerorthent y Typic Calcixerept, que se presentan en la (figura 4.10) y que pertenecen a tres Ordenes: Aridisoles, Entisoles e Inceptisoles según Soil Taxonomy (SSS, 2010).

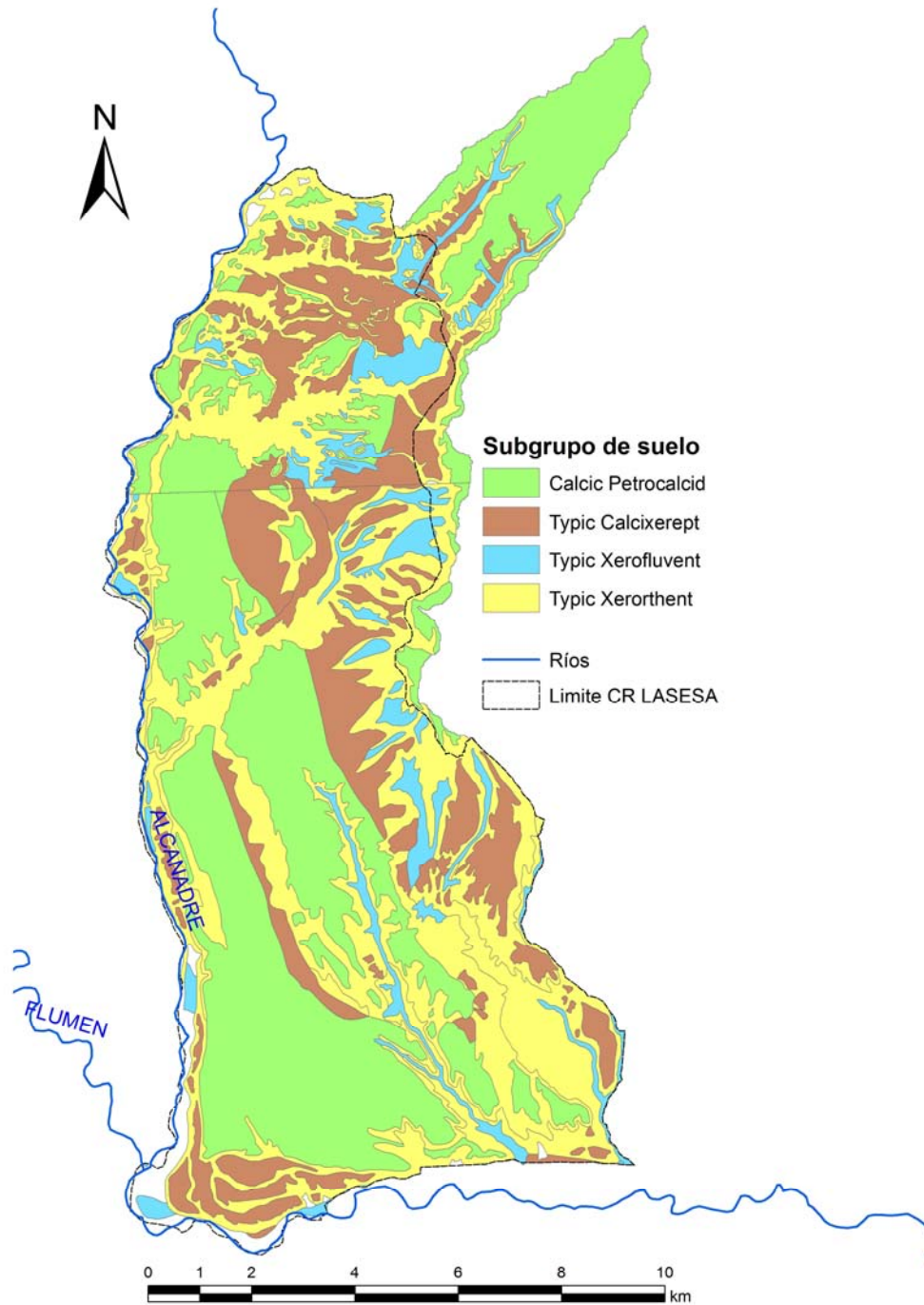


Figura 4.10. Mapa de suelos en LASESA.

4.2 Aguas subterráneas

4.2.1 Introducción

La transformación a regadío supone una modificación importante del ciclo hidrológico en los ambientes semiáridos (Cai et al., 2003; Schoups et al., 2005; Liu et al., 2010). Esto se traduce entre otras cosas en la posible creación de capas freáticas y/o elevación de las preexistentes. Esta situación ya fue vaticinada por RENASA (1975), en su estudio previo a la puesta en regadío y observada por Cuchí (1989). En LASESA, Cuchí (2001) y Ballester (2003) detectaron que se producía un desfase entre riego y descarga de los drenes. Esto sugería la presencia de aguas subterráneas en uno o varios acuíferos, añadía complejidad al modelo hidrológico y se recomendaba controlar las características del acuífero y su evolución piezométrica e hidroquímica durante varias campañas de riego.

La existencia de aguas subterráneas relacionadas con zonas regadas del valle del Ebro es conocida de antiguo, especialmente en relación con el Canal Imperial. También se ha observado en riegos más modernos. Isidoro et al. (2004, 2010), Barros (2011) y Barros et al. (2011) informan de su existencia en el polígono de riego de La Violada en Riegos del Alto Aragón. Por su parte, Causapé (2002), Abrahão (2010) y García-Garizabal (2010) presentan evidencias sobre este tipo de aguas en Bardenas. En algunas zonas como Monegros II, se conoce la existencia de estas aguas subterráneas antes de su puesta en riego (Cuchí, 1989; García-Vera, 1996; Samper-Calvete y García-Vera, 1998; Castaneda y García-Vera, 2008).

A partir de las características geológicas y geomorfológicas de LASESA se asume como hipótesis la existencia de dos conjuntos de acuíferos. El más importante, relativamente somero y de tipo libre, se albergaría en las gravas de las laderas y terrazas de la zona regada, actuando el Terciario como base impermeable. Drenaría hacia la red de drenajes y el Alcanadre. Un segundo acuífero estará albergado en el Terciario, donde los niveles de limolita-argilita actuarían como impermeables y las areniscas como material más permeable. Sin embargo, hay muy poca información sobre estos acuíferos, por lo que se ha estimado necesario realizar una serie de actuaciones que tienen como objetivo conocer la evolución de éstos y sus características.

4.2.2 Metodología

Se han utilizado métodos clásicos en hidrogeología, incluyendo geofísica de sondeos eléctricos verticales y mediciones de conductividad hidráulica en campo y laboratorio.

Se asume que el acuífero principal está albergado en las gravas de las terrazas. Una primera estimación superficial, realizada mediante ArcGis 9.2 ofrece una superficie de 3.144 ha.

4.2.2.1 Inventario de puntos de agua y medición de nivel

Se realizó un exhaustivo recorrido de la zona, en busca de pozos tradicionales y modernos, complementado con entrevistas a los agricultores. En la zona sur-oeste de LASESA se han tenido noticia de la existencia de varios pozos antiguos excavados a mano para abastecimiento del ganado. La mayoría tenían un diámetro de 1,5 m y una profundidad inferior a los 10 m y se distribuían por la terraza Td. La práctica totalidad han desaparecido, salvo uno de ellos en las coordenadas UTM (X: 470.212 m. Y: 4.625.319 m. Huso 30). Cerca, en la llamada “Torre de los pozos” existen algunas balsas donde aflora agua subterránea, que actualmente se reutiliza para riego. La más importante está situada en X: 470.050 m, Y: 4.626.141 m. Huso 30. En los puntos denominados pozo (P) y balsa (B) se han medido sistemáticamente los niveles piezométricos (Figura 4.11).



Figura 4.11. *Pozo y balsa muestreados.*

Además, se ha muestreado el agua de estos dos puntos para conocer la calidad de las aguas del acuífero.

4.2.2.2 Delimitación de capas en el subsuelo mediante sondeos eléctricos verticales

Ante la falta de puntos de agua, se ha realizado un intento de determinar el nivel saturado de agua en la grava y la capa impermeable de base mediante geofísica. Se ha utilizado el método de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV), en el que se pretende obtener esta información mediante el conocimiento de la distribución vertical en profundidad de las resistividades aparentes bajo el punto sondeado a partir de medidas de la diferencia de potencial eléctrico en la superficie. Se utilizó un equipo Geotrón, con apertura de picas según el método Schlumberger, separando progresivamente los electrodos inyectores A y B, entre 1 y 200 metros (Figura 4.12). Los electrodos detectores (M y N) quedan fijos en torno a un punto central fijo, P, como se muestra en Orellana (1972). La profundidad de penetración de la corriente eléctrica depende de la separación de los electrodos inyectores A y B. Si la distancia entre los electrodos A y B aumenta, la corriente circula a mayor profundidad pero su densidad disminuye.

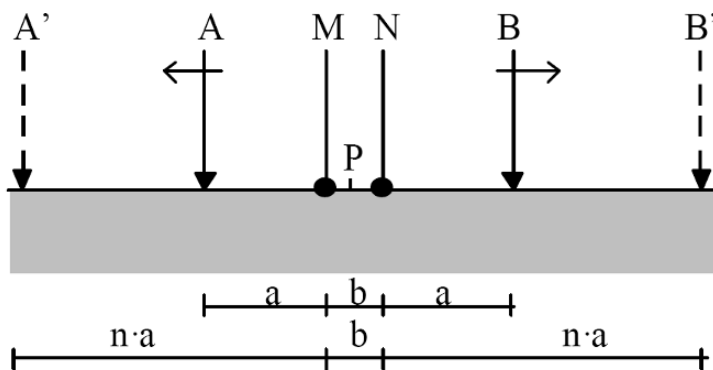


Figura 4.12. Esquema de la medición de resistividad por el método de cuatro electrodos.

No es fácil realizar sondeos en una zona ya transformada en riego por aspersión, al existir numerosas piezas metálicas en los elementos enterrados del sistema de riego. En el verano de 2011 se realizaron tres SEVs en las dos terrazas de mayor superficie dentro de LASESA donde se supone que se encuentra el acuífero más importante. Los dos primeros

SEVs se situaron en la terraza Tc y el tercero en la terraza Td (Figura 4.13). El sondeo denominado “trenes” está situado entre las dos trincheras del ferrocarril, antigua y actual, y se aspiraba que sirvieran como elemento de calibración del método. La denominada cabañera se situaba en la zona baja de la terraza Tc. Junto al pozo P, situado en la terraza Td, donde se conocía la cota de la superficie del agua se realizó otro sondeo.

4.2.2.3 Porosidad y coeficiente de almacenamiento específico

La porosidad total (n) y el coeficiente de almacenamiento específico (S_y) se han calculado volumétricamente en una muestra de grava del acuífero secada con estufa. Para obtener n , se añadió agua hasta su completa saturación. Por drenaje por gravedad, durante un día se determinó S_y .

Considerado el acuífero como de tipo libre, se estimó el almacenamiento de agua en el acuífero en base al área de las terrazas, el nivel freático en el pozo controlado y el almacenamiento específico (S_y).

4.2.2.4 Conductividad hidráulica

Es evidente el interés de este parámetro para caracterizar los diferentes materiales geológicos, de cara a estimar las velocidades del agua subterránea en los diferentes acuíferos. En el presente trabajo se ha obtenido información por diferentes métodos.

4.2.2.4.1 Infiltración final. Se considera que la infiltración final de los ensayos de infiltración por anillos de Müntz, a la que habría que descontar el valor del potencial mátrico, es una estimación de la conductividad hidráulica vertical del terreno.

4.2.2.4.2. Ensayos de Darcy. Se calcula el paso de un volumen conocido de agua a través de una masa saturada de un material, como la grava, de imposible obtención en muestra inalterada.

4.2.2.4.3 Ensayos Lugeon. Consiste en la medida del volumen de agua que se puede inyectar en un tramo de un sondeo geotécnico durante un tiempo y a una determinada presión que ha de mantenerse constante. El tramo donde se va a realizar el procedimiento se aísla mediante obturadores. La permeabilidad obtenida se expresa en

unidades Lugeon definidas como la permeabilidad que permite la admisión de 1 litro de agua por minuto y por metro lineal de sondeo, a una presión de 1 kPa (10 kp cm⁻²). Un Lugeon equivale a una conductividad hidráulica de $1,3 \cdot 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ (Fell et al., 2005).

Para el presente trabajo, ha sido afortunado disponer de los datos realizados por la empresa ENTECSA, durante la realización de sondeos del estudio geotécnico de la presa de Lastanosa.

4.2.2.4.4 Permeámetro de carga variable. La conductividad hidráulica en laboratorio se ha realizado mediante un permeámetro de carga variable sobre muestras inalteradas de material geológico. Las muestras, correspondientes a suelos de terrazas y rellenos de val, se obtuvieron mediante el hincado, a martillazos, de un cilindro biselado de 100 mm de diámetro. Se talló, mediante sonda hueca, una muestra de argilita procedente de la excavación de la presa de Lastanosa.

En laboratorio se satura en agua y mediante un tubo de carga colocado en el extremo superior del cilindro que contiene la muestra y se calcula su conductividad hidráulica (K) mediante la fórmula:

$$K = \frac{d_t^2 \cdot L}{d_c^2 \cdot t} \cdot \ln \left(\frac{h_i}{h_f} \right)$$

Donde L, Longitud de la muestra. d_t , diámetro del tubo. d_c , diámetro de la muestra de suelo. h_i , nivel inicial del agua en el tubo. h_f , nivel final del agua en el tubo. t, tiempo transcurrido entre que el descenso del nivel de agua entre h_i y h_f .

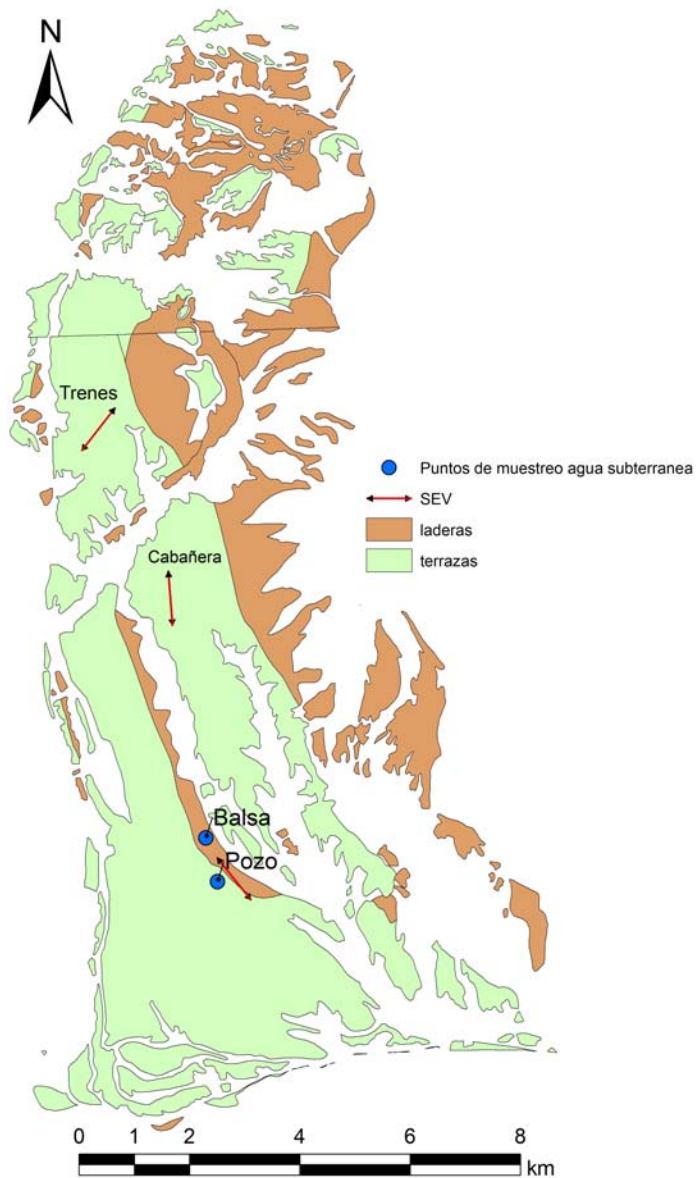


Figura 4.13. Ubicación de los puntos de muestreo de agua subterránea y de los sondeos eléctricos verticales (SEV) en LASESA.

4.2.3 Resultados y discusión

4.2.3.1 Evolución del nivel freático

La evolución del nivel freático en los puntos P y B se presenta en las figuras 4.14 y 4.15. En ambos casos el nivel de referencia es el nivel del terreno. En ambos casos, el nivel freático asciende durante las campañas de riego. Alcanza el máximo a final del verano y disminuye durante el invierno hasta alcanzar niveles similares a los del año anterior. Se

observa que la evolución temporal de B está afectada por bombeos esporádicos. A partir de los datos del pozo, el riego produce una recarga al acuífero que se manifiesta en un ligero incremento del nivel freático de unos 0,40 m. Esta recarga viene compensada por la alta conductividad hidráulica de las gravas, de modo que no parece haber superposición de las recargas de campañas sucesivas. A escala anual, parece que el acuífero ha llegado a un equilibrio.

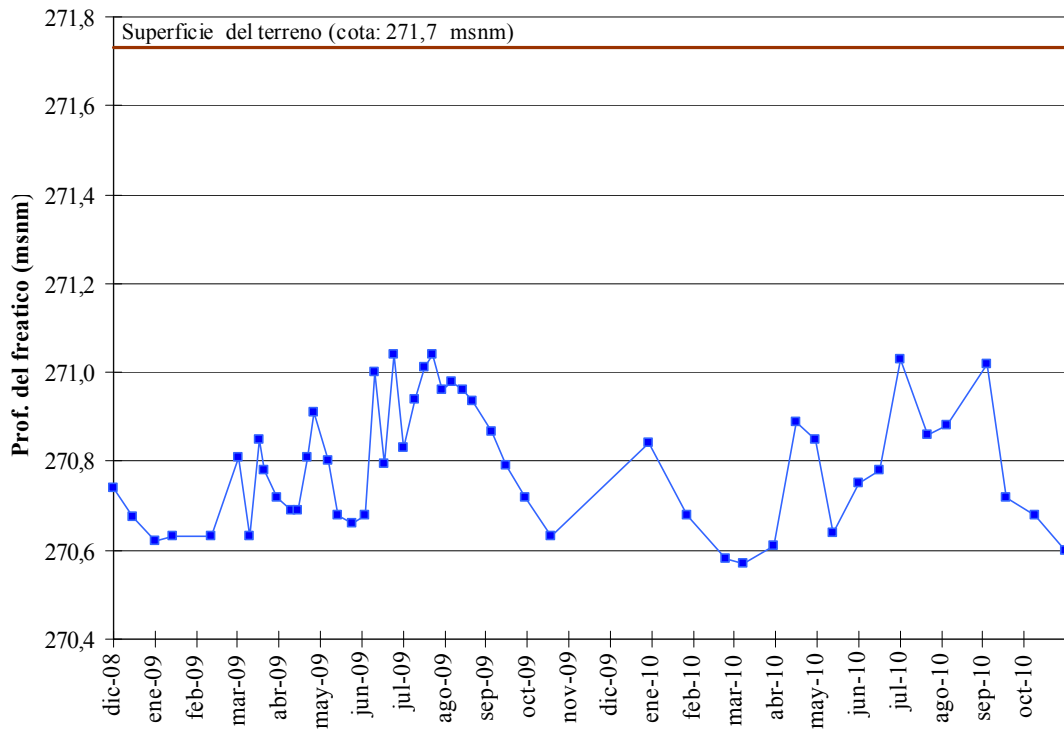


Figura 4.14. Evolución del nivel freático en el pozo durante las campañas 2009 y 2010.

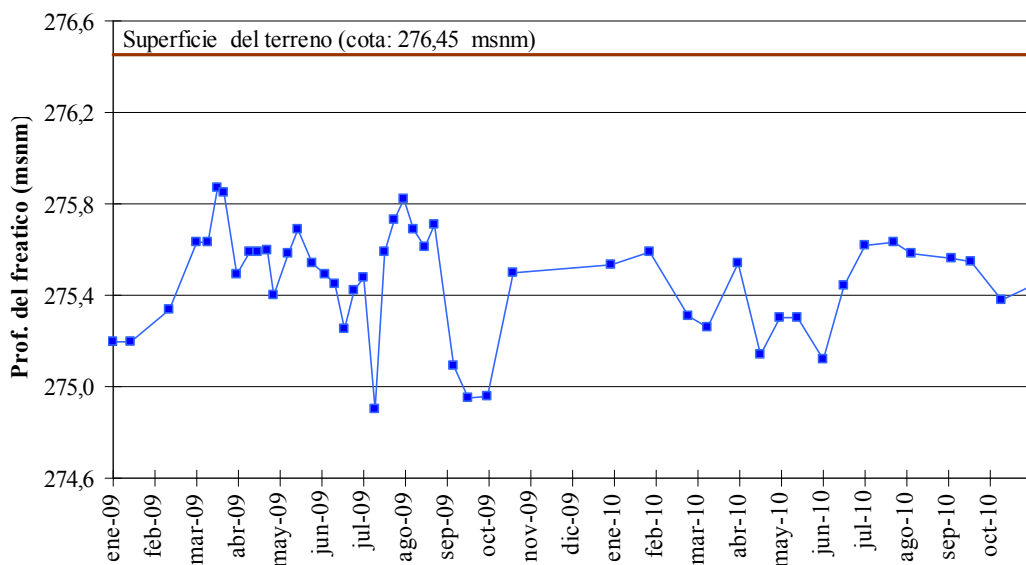


Figura 4.15. Evolución del nivel en la balsa durante las campañas 2009 y 2010.

4.2.3.2 Porosidad y coeficiente de almacenamiento específico

A partir de varias mediciones en diversas muestras de grava del subsuelo, se ha determinado que la porosidad media total es de 12,5%. El Sy medio es 10,3% y la retención específica (Sr) supone sólo un 2,2%.

Suponiendo que el ascenso registrado sea el mismo en todo el acuífero, y que Sy sea también constante, se ha estimado la variación en el almacenamiento de agua (ΔA) en las 3.144 ha del acuífero situado en las gravas de las terrazas (Cuadro 4.8). El volumen total fue de $-0,19 \text{ hm}^3$ entre diciembre de 2008 y octubre de 2010. El almacenamiento varía en función del régimen del riego y de las lluvias. El máximo descenso del nivel freático (Δh) fue de -34 cm y se produjo en octubre, con una disminución en el almacenamiento de $1,1 \text{ hm}^3$.

Cuadro 4.8. Variación mensual del almacenamiento de agua en el acuífero (ΔA) a partir del incremento en el espesor saturado (Δh).

mes	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Campañas	
año	08	08	09	09	09	09	09	09	09	09	09	09	09	09-10
Prof. (cm)	-	99	111	110	92	101	82	105	90	75	87	101		
ΔA (cm)	0	0	-12	1	18	-9	19	-23	15	15	-12	-15	-2,0	
ΔA (hm^3)	-	0,0	-0,4	0,0	0,6	-0,3	0,6	-0,7	0,5	0,5	-0,4	-0,5	-0,06	
mes	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct		
año	09	09	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
Prof. (cm)	110	100	89	105	116	112	88	98	70	85	71	105		
ΔA (cm)	-9	11	11	-16	-11	4	24	-10	28	-15	14	-34	-4,0	-6,0
ΔA (hm^3)	-0,3	0,3	0,3	-0,5	-0,4	0,1	0,8	-0,3	0,9	-0,5	0,5	-1,1	-0,13	-0,19

4.2.3.3 Delimitación de capas en el subsuelo mediante sondeos eléctricos verticales

Como se ha señalado, se realizaron tres SEVs en diferentes puntos. Los resultados de campo interpretados mediante el programa WinSev6, se presentan en la figura 4.16. Los resultados son parcialmente concordantes con un modelo de 3 capas formado por un nivel superior de grava seca que recubre el acuífero también en grava. Bajo éste, está el Mioceno que se presume arcillo-limoso, salino y también saturado. Es necesario, tener en cuenta que el código ofrece más de una posible solución, combinación de espesor y resistividades para los datos de campo.

Los resultados del sondeo realizado junto al pozo muestran que el espesor de grava seca, con una resistividad de $81 \Omega \text{ m}$, es similar a la profundidad del agua en aquel (1,3 m).

Este sondeo da un espesor de grava saturada de unos 12 m, con una resistividad un orden inferior. Bajo esta, otra capa de espesor indefinido presenta una resistividad dos órdenes de magnitud inferiores. Estos valores son concordantes con los que presenta Orellana (1972) y el manual de WinSev6.

El sondeo de la terraza Tc, "cabañera", presenta también un nivel de grava seca, de 1,7 m., aparentemente más seca que junto al pozo. Bajo ella dos niveles similares que en conjunto llegan a los 26 metros de espesor que pudieran corresponder al acuífero y bajo estos otro nivel de muy baja resistividad que pudiera también interpretarse como agua salina en materiales limo-arcillosos.

El sondeo de la terraza Tc, denominado "trenes", ofrece 5,6 metros de grava seca y debajo empieza la zona saturada. A pesar de varias tentativas no se ha conseguido delimitar la profundidad a la que aparece el Mioceno. A reseñar que en las cercanas trincheras del ferrocarril se observan espesores de grava del orden de la decena de metros.

En resumen, la grava seca tiene una resistividad del orden $100 \Omega \cdot m$, la grava saturada presenta un valor del orden de $1 \Omega \cdot m$ y la arcilla saturada parece presentar resistividades de $0,01 \Omega \cdot m$.

A falta de sondeos de exploración, podría asumirse un espesor medio de 10 metros de grava saturada en agua en este acuífero. Sobre la base de la ya citada superficie de terrazas, el valor de S_y y este espesor medio de 10 metros, se obtiene un volumen medio de $32,4 \text{ hm}^3$. Evidentemente este valor tiene que ser tomado con todas las reservas.

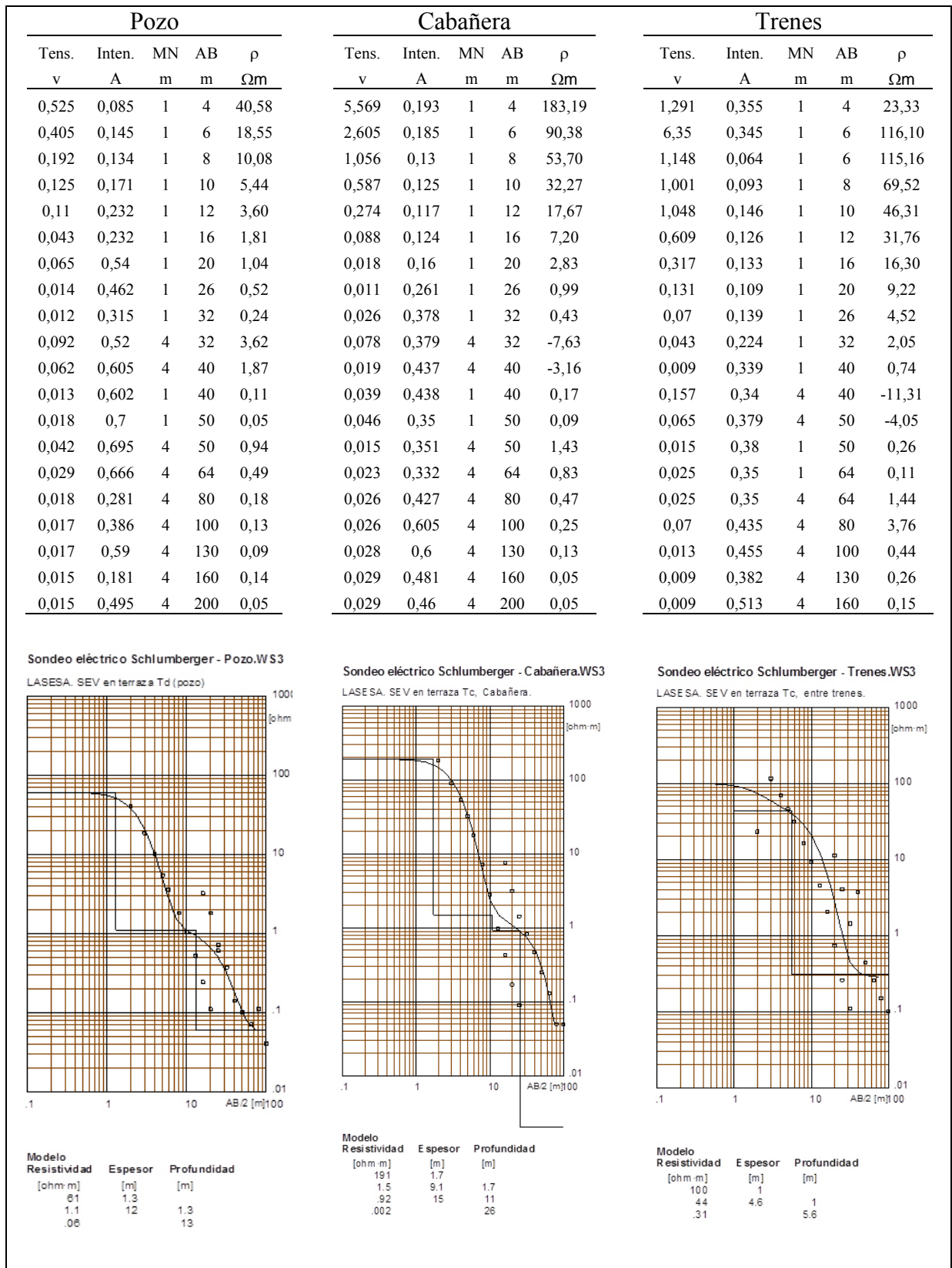


Figura 4.16. Tensiones e intensidades eléctricas medidas para las 20 posiciones de los electrodos (AB) en los 3 sondeos eléctricos verticales (pozo, cabañera y trenes) y sus gráficas logarítmicas entre AB/2 y resistividades aparentes (ρ). Espesores y profundidad de las capas del subsuelo ajustadas por el modelo del programa WinSev6.

4.2.3.4 Conductividad hidráulica

4.2.3.4.1. Infiltración por anillos de Müntz. Los resultados, aplicables a la superficie de las terrazas, se presentan en el cuadro 4.2. Como se ha señalado, habría que descontar el valor del potencial mátrico y los resultados son puramente indicativos.

4.2.3.4.2. Ensayo de Darcy. Este clásico ensayo se ha utilizado para calcular la conductividad hidráulica de una muestra de grava de la Terraza d, (UTM X: 739487; Y: 4627652. Huso 30). La muestra se tomó en la excavación para la reparación de una tubería principal del sistema de riego, en zona saturada. El ensayo se realizó en una columna de 49,6 cm. de altura y 14,5 cm. de diámetro interior. Para un tiempo de paso de tres minutos se obtuvo un valor de K de 931,15 m día⁻¹.

4.2.3.4.3. Ensayos Lugeon. Como se ha señalado, se dispone de datos del estudio geotécnico de la presa de Lastanosa, realizados sobre materiales del Terciario, formados por una alternancia de lutitas y areniscas. Los resultados (cuadro 4.9) revelan bajas conductividades hidráulicas que responden a los valores que ofrecen los textos docentes para las arcillas. Sin embargo, una serie de ensayos no obturaron por areniscas. Se supone que son fracturas en areniscas.

Las areniscas se encuentran interestratificadas entre potentes niveles arcillo-limolíticos de conductividad hidráulica muy baja lo que da al conjunto una conductividad hidráulica muy baja, con un valor medio de $8,9 \cdot 10^{-8}$ m día⁻¹.

Cuadro 4.9. Permeabilidad y Conductividad hidráulica de los materiales terciarios de LASESA mediante ensayos Lugeon.

Sondeo	Profundidad (m)	Permeabilidad (Lg)	Conductividad hidráulica (m/d)
S1	3-10	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
	10-17	$1,7 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$
	17-24	$5,8 \cdot 10^{-7}$	$5,0 \cdot 10^{-9}$
S-2	6-10	$2,6 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$
	10-17	$9,8 \cdot 10^{-7}$	$8,5 \cdot 10^{-9}$
	17-21	$4,0 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-9}$
S-3	12-17	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
	17-22	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
	22-30	$1,9 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$
S-4	5-12	$3,8 \cdot 10^{-5}$	$3,3 \cdot 10^{-7}$
	1-12	No obtura	
	19-26	No obtura	
S-5	3-10	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-8}$
	10-17	$1,0 \cdot 10^{-7}$	$8,6 \cdot 10^{-10}$
	17-24	No obtura	
S-6	1-10	No obtura	
	17-24	No obtura	
	24-30	No obtura	

4.2.3.4.4. Permeámetro de carga variable

Para la determinación de la conductividad hidráulica por el método del permeámetro se tomaron 6 muestras cuya ubicación se presenta en el cuadro 4.10. En total se muestrearon tres suelos de terraza (3 repeticiones por muestra). 2 rellenos de val, a diferentes niveles, dentro de la ubicación (6 repeticiones). Por seguridad, se hicieron 16 repeticiones de la muestra de lutita.

Cuadro 4.10. Ubicación de muestras de LASESA para determinación de conductividad hidráulica mediante método de permeámetro de carga variable.

Terraza 1	UTM, H30	X: 740.101 m	Y: 4.628.530 m
Terraza 2	UTM, H30	X: 740.625 m	Y: 4.624.561 m
Terraza 3	UTM, H30	X: 739.650 m	Y: 4.622.293 m
Relleno val 1	UTM, H30	X: 738.975 m	Y: 4.636.661 m

Los resultados aparecen en el cuadro 4.11. Presentan evidentes diferencias en función del origen y textura. Los valores más altos corresponden a las terrazas y el más bajo a la muestra de lutita. Los valores obtenidos son acordes con los que presentan textos clásicos para las texturas de estas muestras.

Cuadro 4.11. Conductividad hidráulica (*K*) del suelo y subsuelo de LASESA medida con el permeámetro de carga variable.

	dt	L	dc	hi	hf	t	K	K
	(cm)	(cm)	(cm)	(m)	(m)	(s)	(m/s)	(m/d)
sasos, terrazas y laderas	1,57	14,5	10	1,635	0,26	24,8	0,00026	22,90
	1,57	14,5	10	1,61	0,26	24,67	0,00026	22,82
	1,57	14,5	10	1,595	0,26	24,67	0,00026	22,71
	0,95	14,5	10	1,68	0,26	9,91	0,00025	21,29
	0,95	14,5	10	1,6	0,26	9,61	0,00025	21,38
	0,95	14,5	10	1,595	0,26	9,53	0,00025	21,52
	0,55	14,5	10	1,655	0,26	3,94	0,00021	17,80
	0,55	14,5	10	1,59	0,26	3,57	0,00022	19,22
	0,55	14,5	10	1,585	0,26	3,44	0,00023	19,91
vales y terciario	1,57	14,5	10	1,66	1,36	398	0,0000018	0,15
	1,57	14,5	10	1,66	1,25	568	0,0000018	0,15
	1,57	14,5	10	1,66	1,06	905	0,0000018	0,15
	1,57	14,5	10	1,66	0,96	1110	0,0000018	0,15
	1,57	14,5	10	1,66	0,76	1598	0,0000017	0,15
	1,57	14,5	10	1,66	0,54	2325	0,0000017	0,15
	1,57	14,5	10	1,5	1,45	75	0,0000016	0,14
	1,57	14,5	10	1,5	1,36	222	0,0000016	0,14
	1,57	14,5	10	1,5	1,26	403	0,0000015	0,13
	1,57	14,5	10	1,5	1,16	601	0,0000015	0,13
	1,57	14,5	10	1,5	1,04	865	0,0000015	0,13
	1,57	14,5	10	1,5	0,91	1193	0,0000015	0,13
lutitas	1,57	14,5	10	1,73	1,04	2040	0,00000089	0,0770
	1,57	14,5	10	1,04	0,94	1500	0,00000024	0,0208
	1,57	14,5	10	0,94	0,92	1920	0,00000004	0,0035
	1,57	14,5	10	0,92	0,895	4140	0,00000002	0,0021
	1,57	14,5	10	1,72	1,06	2640	0,00000066	0,0566
	1,57	14,5	10	1,06	0,97	10860	0,00000003	0,0025
	1,57	14,5	10	0,97	0,76	52920	0,00000002	0,0014
	1,57	14,5	10	0,76	0,695	20940	0,00000002	0,0013
	1,57	14,5	10	1,71	1,507	1560	0,00000029	0,0250
	1,57	14,5	10	1,507	0,858	62220	0,00000003	0,0028
	1,57	14,5	10	0,858	0,842	4500	0,00000001	0,0013
	1,57	14,5	10	1,69	1,36	18720	0,00000004	0,0036
	1,57	14,5	10	1,36	1,011	65400	0,00000002	0,0014
	1,57	14,5	10	1,011	0,94	20220	0,00000001	0,0011
	1,57	14,5	10	1,687	1,146	104220	0,00000001	0,0011
	1,57	14,5	10	1,685	0,986	219481	0,00000001	0,0008

4.2.3.5 Modelo de flujo de agua subterránea

La información obtenida en los apartados anteriores permite diferenciar diversas unidades hidrogeológicas, que pueden tener un papel relevante a la hora de realizar balances de agua en LASESA.

a) Gravas y materiales asociadas en los sasos, terrazas y laderas formadas por desmantelamiento de aquellos. Presentan una alta porosidad y un coeficiente de almacenamiento específico que llega al 10% en gravas limpias. Estos parámetros varían espacialmente por presencia de niveles de arena de origen fluvial, por el grado de cementación por carbonato cálcico u otros procesos edáficos. La conductividad hidráulica es alta, llegando a los 900 m día^{-1} . En gravas limpias, pero en horizonte superficial se han obtenido datos de 20 m día^{-1} .

b) Materiales del Terciario, considerados como un conjunto con una alternancia subhorizontal de lutitas y areniscas. En estas condiciones presentan muy baja conductividad hidráulica, como se observa en diversos ensayos Lugeon. A escala menor se diferencia entre lutitas y areniscas. Las primeras tienen una baja conductividad hidráulica, del orden de $10^{-3} \text{ m día}^{-1}$. Las segundas pueden presentar un valor mayor de este parámetro, bien por fisuración o por falta de cementación.

c) Rellenos de vales, que se presentan en el fondo de los barrancos que drenaban naturalmente la zona hacia el Alcanadre. Están formadas por arenas y limos, junto con algún canto de grava, erosionados de terrazas y terciario. Presentan una conductividad hidráulica del orden de $0,14 \text{ m día}^{-1}$.

A partir de estas unidades se ha realizado un primer modelo conceptual sobre el flujo de aguas subterráneas en LASESA que es muestra en la figura 4.17.

En este esquema se asume que existe un acuífero en terrazas y gravas de laderas, situado en la mayor parte de LASESA, excepto en el sector XXIX. Es un acuífero libre, en muchas zonas con el freático a un metro de profundidad. El espesor saturado es limitado, del orden de la decena de metros, pero tiene que fluctuar. El terciario subyacente actúa como base impermeable. La transmisión de agua entre terrazas se efectúa a través de rampas, las laderas, de materiales groseros procedentes del desmantelamiento de la terraza superior. En los puntos en que no hay conexión, por afloramientos de los materiales terciarios el agua subterránea discurre por la superficie de estos hacia la terraza inferior.

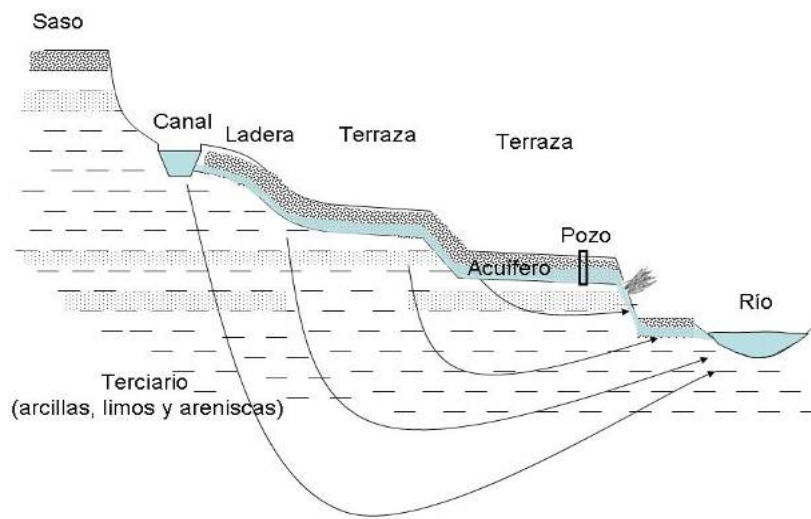


Figura 4.17. Esquema conceptual del flujo de agua subterránea en LASESA.

La recarga actual se produce principalmente en la superficie regada. El flujo sigue una dirección general este-oeste, excepto en la zona sur. Los barrancos naturales y el colector XXXII^a-2^a derivan hacia ellos la descarga de agua subterránea. En la periferia oeste y sur de LASESA, una parte del drenaje subterráneo descarga directamente al Alcanadre. En los puntos en que la grava queda colgada sobre el Terciario, el rezume de agua subterránea genera acumulaciones de freatofitas.

Se asume que este acuífero recoge, almacena y transporta la mayor parte del agua que percola más allá de la zona radicular.

En segundo lugar, es posible que existan acuíferos mucho más modestos en el relleno de las diversas vales que forman el drenaje natural. El agua fluye a través del terreno y sobre el terciario. Se supone que las dimensiones de estos, en conjunto, son mucho menores que los del acuífero en las gravas.

En tercer lugar es posible la existencia de uno o varios acuíferos en los materiales terciarios. Es cierto que tienen una menor conductividad hidráulica en conjunto, pero los niveles de arenisca pueden ser más conductivos. Ejemplos en la zona de Monegros se han citado en Cuchí (1989, 1998), Berga (1993), García-Vera (1996), Samper-Calvete y García-Vera (1998) Castaneda y García-Vera (2008).

4.3 Conclusiones

Los suelos tienen un pH moderadamente básico y no presentan problemas de salinidad. Los desarrollados sobre terrazas y laderas tienen una elevada pedregosidad que, en general, aumenta con la profundidad. También se observa un aumento en el porcentaje de arena en los horizontes inferiores. Los suelos desarrollados sobre Terciario y los rellenos de vales, no tienen piedras y su textura es más fina.

Las velocidades de infiltración permiten diferenciar dos unidades. La unidad más permeable está formada por los sasos, terrazas y laderas, con una relativamente alta velocidad de infiltración estabilizada ($0,31 \text{ cm min}^{-1}$). En la menos permeable, formada por suelos desarrollados sobre Terciario, este parámetro es casi diez veces menor.

De acuerdo con la capacidad de retención de agua disponible (CRAD) del suelo se han establecido tres unidades. La CRAD es muy baja ($<64 \text{ mm}$) en el 34% de la superficie debido a la escasa profundidad de los suelos con horizonte petrocálcico. Estos suelos requieren unas dosis de riego baja y una frecuencia alta. El resto de la superficie tiene mayor capacidad de retención de agua, por lo que las dosis de riego pueden ser mayores y las frecuencias menores.

Se han identificado cuatro subgrupos de suelos, que pertenecen a tres órdenes de suelos, Aridisoles, Entisoles e Inceptisoles. El mapa de suelos muestra la distribución espacial de los cuatro subgrupos: Calcic Petrocalcicid, Typic Xerofluvent, Typic Xerorthent y Typic Calcixerept. Los suelos de terrazas se han desarrollado sobre los depósitos fluviales, en forma de capas alternas de arenas y gravas calizas, con matriz limo-arenosa. El clima y el paso del tiempo provocan su paulatina carbonatación. Así, los más recientes o desarrollados sobre terrazas inferiores se clasifican como Typic Xerofluvent y mantienen sus originales propiedades flúvicas. Los desarrollados sobre las terrazas intermedias se clasifican como Typic Calcixerept y presentan una incipiente acumulación de carbonatos secundarios, en forma de cemento geopetal. Los más viejos desarrollados sobre las terrazas superiores y sasos se clasifican como Calcic Petrocalcicid y han sufrido procesos de cementación dando lugar a endopediones petrocálcicos a poca profundidad. Lo que inducen una muy baja capacidad de retención de agua disponible. Para conseguir una buena eficiencia de riego en estos suelos no hay que sobrepasar su capacidad de almacenamiento. Este tipo de suelos supone un tercio del suelo de la comunidad de regantes. El resto de suelos son: (1) las laderas (Typic Calcixerept) que conectan los

distintos niveles de terraza y se desarrollan a partir de la erosión de estas, (2) las vales (Typic Xerofluvent) que se desarrollan a partir de los sedimentos que se derivan tanto de las terrazas como materiales del terciario y que rellenan los barrancos y (3) los denominados como Terciario (Typic Xerorthent) que se caracterizan por la presencia de Lutita a un metro de profundidad.

Con el actual nivel de información, se puede concluir que existe un acuífero libre, albergado en las arenas y gravas de las terrazas bajo la zona regada. Su espesor saturado medio puede llegar a la decena de metros. Con un coeficiente de almacenamiento específico de un 10%, se puede estimar un volumen total aproximado de unos 30 hm³, de agua almacenada. La conductividad hidráulica de estos materiales es alta y varía en función del contenido de fino. En los horizontes superficiales, básicamente terrosos, es del orden de 0,1 m día⁻¹. En gravas limpias asciende hasta los 900 m día⁻¹.

El nivel freático está influenciado por el riego y las lluvias. Se incrementa desde el inicio de la campaña de riego, llega al máximo a final del verano y disminuye cuando cesa el riego, para alcanzar rápidamente niveles similares a los de principio de la campaña. Este comportamiento es compatible con los altos valores medidos de K.

Los materiales terciarios que forman la base de este acuífero tienen valores de K mucho menores (0,013 m día⁻¹ según el permeámetro de carga variable y $8,9 \cdot 10^{-8}$ m día⁻¹ en los ensayos Lugeon), por lo que pueden considerarse base del acuífero superior. La discrepancia entre resultados de ambos ensayos puede asumirse sobre la base que se realizan de forma diferente. Los materiales de relleno de val, formados por movilización y mezcla de materiales del Terciario y finos de terraza tienen un valor de K intermedio.

Es posible que, en profundidad, haya otro acuífero en el material terciario, de flujo mucho más lento.

5 Manejo del riego

5.1 Introducción

La depresión central del Valle del Ebro es un claro ejemplo de zona semiárida con escasez de recursos de agua que tiene amplias zonas regables donde conviven sistemas tradicionales de riego por superficie con modernos sistemas de riego presurizado. En los últimos años, los segundos han crecido a favor de los primeros, ya que se ha favorecido la modernización de los regadíos, con cambio de sistema, desde los gobiernos central y autonómico. De hecho un tercio de los regadíos de Aragón ya cuentan con riego presurizado (124.500 ha). En Riegos del Alto Aragón hay unas 50.000 ha con este tipo de riego (Lecina et al., 2008 y 2010b). La comunidad de regantes de LASESA fue una de las pioneras en la instalación de riego por aspersión, hace ya más de 30 años. Se supone que la proporción de riego por aspersión seguirá aumentando en detrimento del riego por gravedad y en función de las disponibilidades económicas.

Cuando el agua es un recurso limitado, es evidente el interés por analizar su uso. Por este motivo, en Aragón se han realizado numerosos estudios que analizan la utilización del agua de riego, a partir de la comparación entre las necesidades hídricas de los cultivos y el riego aplicado en la realidad. Diversos autores han calculado el índice estacional de calidad de riego, que se define como el cociente entre las necesidades hídricas netas por el riego aplicado (Tedeschi et al., 2001; Cavero et al., 2003; Dechmi et al., 2003; Ruiz et al., 2008; Mur, 2009; Skhiri y Dechmi, 2012; Salvador et al., 2011a). En el valle del Ebro, estos autores encuentran un valor medio para el riego por aspersión que supera el 90%

En la misma zona, se han realizado balances de agua a partir de los que se determina que la eficiencia media del riego por aspersión se sitúa en torno al 70% (Abrahão et al., 2011a; Skhiri y Dechmi, 2012). La máxima eficiencia del riego por aspersión a nivel de parcela es del 90%, para alcanzarla es necesaria una correcta programación (Tanji y Kielen, 2002). En la práctica, esta está sometida básicamente al criterio del regante, que ha demostrado ser insuficiente en muchos casos (Salvador et al., 2011b). Sin embargo, los sistemas de riego presurizado ofrecen gran flexibilidad a la hora de establecer la programación del riego en parcela. Por esta razón muchos de los estudios científicos del riego por aspersión se han orientado hacia la evaluación del riego y a optimizar su programación (Cancela et al., 2006; Lorite et al., 2007). Incluso se han propuesto sistemas basados en software de toma de decisiones de riego a partir del análisis los datos disponibles para cada zona y cultivo (Chopart et al., 2007; Zapata et al., 2009; Liyuan et al., 2010).

5.2 Metodología

5.2.1 Descripción de la comunidad de regantes

LASESA abarca un total de 9.786 ha repartidas en 1.253 parcelas pertenecientes a 654 propietarios, y organizadas en 5 sectores hidráulicos independientes entre sí. Prácticamente en su totalidad se encuentra equipada con sistemas de riego por aspersión. El 72% de su superficie está equipada con cobertura total y el resto con pívot. La disposición más frecuente en la primera es el marco de T18X21, aunque también existen coberturas antiguas a marco T21x21. En las transformaciones o renovaciones ya solo se instalan marcos T18x18. La mayoría de los aspersores están situados a una altura entre 2 y 2,40 m sobre el nivel del suelo para adaptarse bien al cultivo del maíz. Normalmente los aspersores tienen boquillas de 4,4x2,4 mm para los marcos T18x21 y T18x18. En los marcos T21x21 se utilizaron boquillas de 6x2,4 mm que aún se encuentran.

El agua para riego se capta del canal de Pertusa, procedente del río Cinca desde el embalse de El Grado. En el canal, existe una estación de aforo, aguas arriba de la primera toma de LASESA, manejada por la CHE y que sirve para la facturación global de este organismo a esta comunidad. Cada sector dispone de captación propia, estación de bombeo y embalse de regulación, desde el que se abastece la red de riego con funcionamiento independiente. Recientemente se ha terminado la construcción de un embalse de 10 hm³.

La distribución de caudales a las respectivas parcelas se realiza a través de la red de tuberías mediante 1.300 hidrantes que son maniobrados manualmente por los usuarios. Los hidrantes están provistos de válvula de compuerta, válvula hidráulica que regula la presión y el caudal. La presión está regulada a 450 kPa y el caudal puede ser de 12, 24 y 36 L s⁻¹ aunque el 90% es de 12 L s⁻¹. La mayoría de las parcelas equipadas con cobertura total están divididas en módulos de 0,8-0,9 ha. Cada módulo de riego tiene 24 aspersores como media. No hay contadores en los hidrantes, pero está prevista su instalación en un futuro próximo en parte para evitar riegos fraudulentos.

LASESA se encarga de organiza las demandas de agua de los regantes. Los agricultores compran el agua en entidades bancarias por adelantado, en vales de 1.000, 2.000 y 5.000 m³.

En su momento, los regantes entregan los oportunos vales en las oficinas de la comunidad, indicando hidrante y fecha de riego. Este comienza a las 12:00 h y acaba a las 12:00 h del día siguiente. El secretario de la comunidad es el encargado de organizar los riegos. Diariamente envía la solicitud de agua a la CHE y asigna el caudal del canal de Pertusa, hasta un máximo de 0,82 l/s ha, entre los potenciales usuarios. Entre petición y riego transcurren cuatro días. Se espera que el embalse recientemente construido permita disminuir este tiempo.

Hay poca información publicada sobre consumos de agua de LASESA. Mur (2009) indica que la dosis media aplicada en la campaña 2008 fue de 655 mm.

5.2.2 Recolección y procesado de datos

Mediante el programa ArcGis 9.2, se realizó un primer mapa de cultivos en base a las declaraciones de la política agraria comunitaria (PAC). La base cartográfica empleada fue el parcelario del SIGPAC, que está dividido en recintos. Se creó un código identificador para cada recinto que sirvió para asociar los datos declarados por los agricultores con la base cartográfica. Este mapa fue actualizado con sucesivas visitas a campo, durante los meses de mayo, junio y octubre de 2009 y 2010, para tener en cuenta a los segundos cultivos anuales que no se recogen en la PAC. Los recintos SIGPAC se agruparon por cultivo y por tipo de suelo para determinar y analizar los patrones de riego.

LASESA proporcionó los datos de consumo por unidad de riego. La comunidad entiende por tal la unidad de facturación a cada parcela. El agua puede ser suministrada por uno o varios hidrantes. Estos datos de riego se asociaron, en un trabajo laborioso, a la base cartográfica del SIGPAC y de esta manera se determinó el volumen de riego diario aplicado a cada una de las 787 unidades de riego. El resultado es un archivo que contiene cerca de los 120.215 riegos que se produjeron durante los dos años de estudio. Así se ha creado una base de datos que contiene para cada unidad de riego: la fecha de cada riego, su volumen de agua facturada, los cultivos, el regante, la superficie y los datos agrometeorológicos. Entre otras cosas, se ha analizado la influencia que tienen las lluvias y el tipo de cultivo sobre la actual programación del riego, comparando la evolución diaria entre el número de hidrantes abiertos y la precipitación.

Se han realizados dos tipos de correcciones. Una volumétrica, dado que la unidad de facturación en LASESA es de 1.000 m^3 por periodo de riego (24 h) en los hidrantes de 12 l/s. En la práctica, manteniendo abierto el día completo se produce un suministro real de $1036,8 \text{ m}^3/\text{día}$. Para subsanar esta diferencia se aplicó un factor de corrección de 1,0368, mediante el cual se obtuvo el volumen de agua de riego real (R). Además, se han descartado aquellas parcelas en las que el volumen y la distribución anual del agua de riego no se corresponden con el cultivo declarado en la PAC. Como consecuencia de este proceso, la base de datos final contiene 52.029 eventos de riego de 523 unidades de riego (6.409 ha) durante los dos años de estudio.

5.2.3 Programación del riego

La programación del riego de cada parcela se extrae de la base de datos generada en el apartado anterior. Los datos diarios se agrupan por semana, cultivo y capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (CRAD) de cada parcela. A partir de la base de datos se analiza la programación actual y se estudia su relación con la calidad del riego (apartado 5.2.5). Con base en este análisis se propone una nueva programación con el objetivo de optimizar el uso del agua de riego. Con ella se simula un cambio en los riegos y se vuelve a ejecutar el balance de agua en el suelo con las mismas condiciones de las campañas de 2009 y 2010. Los resultados de la simulación permiten estimar los efectos que produciría la nueva programación.

5.2.4 Balance de agua en el suelo

El balance de agua se elaboró a partir de la medición y estimación de las entradas y salidas del suelo explorado por las raíces de los cultivos. El balance de agua en el suelo hace un reparto teórico del agua de lluvia (P) y riego (R) entre la evapotranspiración real (ET_R), el drenaje (D_S) y el almacenamiento del agua en el suelo (AU). Se hizo el balance diario de agua en el suelo de cada parcela durante las campañas de riego 2009 y 2010. Este balance teórico sigue la metodología descrita por Causapé (2008a) y permite estimar la ET_R , D_S y la precipitación efectiva (Pe).

Los datos de P, velocidad del viento (v) y humedad relativa (HR) se obtuvieron de la estación SIAR en Puyalón (Sariñena). La evapotranspiración de referencia (ET_0)

utilizada, es la calculada para estación por la Oficina del Regante (OR) según el método de Penman Monteith (Allen et al., 1998).

Los datos de riego, como se ha indicado han sido proporcionados por la comunidad de regantes. El porcentaje de pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión (PEA) se estimó según la relación encontrada por Playán et al. (2005a).

$$PEA (\%) = 20,34 + 0.214 \cdot v^2 - 2,29 \cdot 10^{-3} \cdot HR^2$$

La evapotranspiración potencial (ET_C) se ha calculado a partir de la fórmula de Allen et al. (1998).

$$ET_C = ET_0 \cdot K_C$$

Los coeficientes de cultivo se han determinado también mediante Allen et al., (1998). Para la mayoría de cultivos, excepto maíz y alfalfa, se han utilizado los establecidos para la comarca agraria nº 57 (Sariñena) por Martínez-Cob (2004).

Para maíz, se ha realizado un cálculo ad hoc a partir de las fechas locales definidas mediante una encuesta realizada a los regantes de LASESA. En el cuadro 5.1 se presenta la fenología del maíz, en las tres modalidades de cultivo y las fechas de siembra (D1), inicio de las fases de desarrollo, intermedia y final (D2, D3 y D4, respectivamente) y la fecha de fin de ciclo (D5).

Cuadro 5.1. Fenología del cultivo de maíz en LASESA. Fechas de siembra (D1), inicio fases de desarrollo, intermedia y final (D2, D3 y D4) y fin de ciclo (D5).

Cultivo	D1	D2	D3	D4	D5
Maíz	20-abr	25-may	4-jul	23-ago	10-oct
Maíz 2ª cosecha detrás de guisante	1-jun	26-jun	31-jul	9-sep	1-nov
Maíz 2ª cosecha detrás de cebada	10-jun	5-jul	4-ago	8-sep	30-oct

La fenología del cultivo de alfalfa está condicionada por los seis cortes que recibe a lo largo del año. Sus fechas aproximadas son: 15 de abril, 20 de mayo, 24 de junio, 29 de julio, 2 de septiembre y 7 de octubre. Estas fechas marcan el final e inicio de cada uno de los seis ciclos anuales considerados en la fenología de este cultivo.

Para periodos y superficies sin cultivo, se asignó un coeficiente de suelo desnudo. A los cultivos minoritarios catalogados como “Otros cultivos”, se asignó un valor constante de $K_c = 1$. Para el cálculo del K_c inicial se considera tipo de suelo, frecuencia de riegos y ET_0 .

Los datos de P , R , PEA , y ET_c se han utilizado para desarrollar el balance de agua en el suelo de cada una de las 523 parcelas estudiadas. Para simplificar el cálculo a cada parcela se le asigna un único valor de $CRAD$. Este valor se corresponde con la $CRAD$ del suelo mayoritario de cada parcela y puede ser alta (230 mm), media (130 mm) o muy baja (30 mm). No se dispone del contenido de agua en el suelo de cada parcela. Para comenzar el balance, se ha partido de la hipótesis que este parámetro al principio de la campaña de riego es igual al 50% de la $CRAD$.

Al agua útil inicial (AU_i) se le suma las entradas por el riego ($R-PEA$) y precipitación (P), y se le resta la ET_c siempre y cuando haya suficiente AU en el suelo. Así pues, se considera que:

$$\text{Si } AU_i + P + R - PEA < ET_c \Rightarrow ET_R = AU_i + P + R - PEA; \quad AU_f = 0$$

En cambio:

$$\text{Si } AU_i + P + R - PEA > ET_c \Rightarrow ET_R = ET_c$$

$$\text{Si } AU_i + P + R - PEA - ET_R > CRAD;$$

$$AU_f = CRAD$$

$$D_s = AU_i + P + R - PEA - ET_R - CRAD$$

Se considera que se ha sobrepasado la capacidad de campo del suelo obteniéndose un drenaje teórico (D_s).

$$\text{Si } AU_i + P + R - PEA - ET_R < CRAD;$$

$$AU_f = AU_i + P + R - PEA - ET_R$$

$$D_s = 0$$

Adicionalmente y aprovechando la información generada en el balance de agua, se estima la precipitación efectiva (Pe) para cada día en cada parcela considerando que:

$$\text{Si } P < \text{CRAD} + \text{ET}_R - \text{AU} \Rightarrow \text{Pe} = P$$

$$\text{Si } P > \text{CRAD} + \text{ET}_R - \text{AU} \Rightarrow \text{Pe} = \text{CRAD} + \text{ET}_R - \text{AU}$$

La precipitación efectiva se define como la parte de la precipitación que aprovecha la planta para evapotranspirar.

También se estimó el volumen de drenaje procedente del riego (D_R) considerando en los días y parcelas con drenaje que:

$$\text{Si } \text{AU} + P - \text{ETR} > \text{CRAD}, \Rightarrow D_R = R - \text{PEA}$$

$$\text{Si } \text{AU} + P - \text{ETR} < \text{CRAD}, \Rightarrow D_R = R - \text{PEA} - [\text{CRAD} - (\text{AU} + P - \text{ETR})].$$

Esta estimación supone que durante un día siempre se produce antes la lluvia que el riego y en consecuencia prioriza el drenaje del riego sobre el de la lluvia.

5.2.5 Calidad del riego

El manejo del riego se analiza mediante la utilización de cuatro índices que evalúan la calidad del riego: la eficiencia de riego (ER), la fracción de drenaje del riego (FD_R), el déficit hídrico (DH) y el rendimiento del riego (RIS). Estos índices fueron calculados para cada parcela a partir de los datos del balance de agua en el suelo. Se han escogido estos cuatro índices porque ya han sido utilizados en estudios de otros regadíos y permiten su comparación.

La forma de calcular las necesidades hídricas netas (NHn) y los tres primeros índices han sido descritos por Causapé (2009a). El cuarto índice fue desarrollado por Perry (1996). Los índices se calcularon sobre una base diaria aunque los resultados se muestran agrupados por semanas. Las NHn estiman el volumen de agua de riego necesario para que los cultivos no sufran estrés hídrico y el suelo quede en las mismas condiciones de humedad al final del período.

$$\text{NHn} = (\text{ET}_c + \text{AU}_f) - (\text{AU}_i + \text{Pe})$$

La ER evalúa el porcentaje del volumen de riego que se ha utilizado para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos o acumulado en la reserva de agua en el suelo.

$$ER = \left[1 - \left(\frac{D_R + PEA}{R} \right) \right] \cdot 100$$

La fracción de drenaje del riego FD_R cuantifica qué porcentaje del riego se pierde en el drenaje condicionado por la dosis de riego y la humedad del suelo en el momento de aplicar el riego.

$$FD_R = \frac{D_R}{R} \cdot 100$$

El déficit hídrico evalúa en qué grado el riego ha sido incapaz de satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos para no disminuir su potencial rendimiento por estrés hídrico.

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

Los valores de los índices ER, FD_R y DH pueden tener valores desde 0 a 100%. Un buen manejo del riego vendrá determinado cuando la ER se aproxime al 100% y cuando el DH y la FD_R sean nulos.

Finalmente se calcula para toda la campaña el índice RIS (Relative Irrigation Supply) como el coeficiente entre la cantidad de agua aplicada a una parcela y las necesidades de riego netas de la misma (Perry, 1996).

$$RIS = \frac{R}{NHn}$$

El índice RIS tiene unos teóricos valores límite entre 0 e infinito. Un valor mayor de 1 indica que el riego ha sido superior a las necesidades hídricas netas del cultivo y por tanto ha sido regado por exceso. Por el contrario un valor menor de 1 indica que el riego ha sido insuficiente para cubrir las necesidades hídricas netas. Los valores calculados por Molden et al. (1998) para diversos regadíos mundiales se presentan en un rango entre 0,41 y 4,81.

5.3 Resultados y discusión

5.3.1 Programación de riego actual

El programación actual se caracteriza por un número riegos distribuidos a lo largo del periodo vegetativo de cada cultivo. La figura 5.1 presenta la evolución del número medio de riegos por semana de cada cultivo. En esta comunidad, que funciona con vales volumétricos a usar en 24 horas, la forma de adaptarse a las necesidades hídricas de los cultivos se realiza variando el número de días de riego por semana. Como era de esperar el riego se intensifica durante periodo de máximas necesidades, que coincide con los meses de julio y agosto (semanas 27-35). Es también durante ese periodo cuando se produce una cierta diferenciación entre la programación de cada cultivo. El maíz se riega entre tres y cuatro veces por semana, y la alfalfa tres veces. El resto de la campaña la diferenciación no es tan clara, a excepción de los cultivos de invierno como la cebada que no se riega a partir de mitad de junio.

La diversidad de las programaciones de riego individuales es de tal magnitud que ha sido imposible definir grupos característicos. Su análisis requeriría un estudio detallado de las estrategias de riego por agricultor que se ha decidido no abordar, porque desborda los límites del presente trabajo. Como primera aproximación, se han seleccionado seis casos de programación de riego representativa de cada cultivo (figura 5.2). El criterio de elección ha sido que el volumen anual de agua utilizada y el número de días de riego sean los más cercanos a los valores medios. De la figura 5.2 se deduce que muchos regantes siguen un patrón de riego semanal regando siempre en los mismos días de la semana con independencia de los cambios en las necesidades hídricas del cultivo. Un ejemplo de la variabilidad en los calendarios de riego se observa en el cultivo de maíz. En los casos escogidos de maíz después de cebada y como cultivo único se regó dos días consecutivos separados por un día sin riego y en el caso de maíz después de guisante se riega sistemáticamente de lunes a jueves. El número medio de riegos es similar, pero se diferencian en su distribución a lo largo de la semana. Se observan diferentes esquemas de riego en los ejemplos seleccionados para los tres tipos de cultivo de maíz, a pesar que tienen las mismas necesidades de agua durante julio y agosto. Parece evidente que esto se

debe de las preferencias individuales de cada regante, en la línea de lo apuntado por Salvador et al. (2011b).

Por otro lado, una inspección de toda la base de datos revela que la mitad de los riegos se aplicaron durante dos días consecutivos. Esta práctica puede suponer que se pierda agua por drenaje en el caso de los suelos de muy baja CRAD ya que la cantidad de agua aplicada en dos riegos seguidos puede superar la capacidad de almacenamiento del suelo.

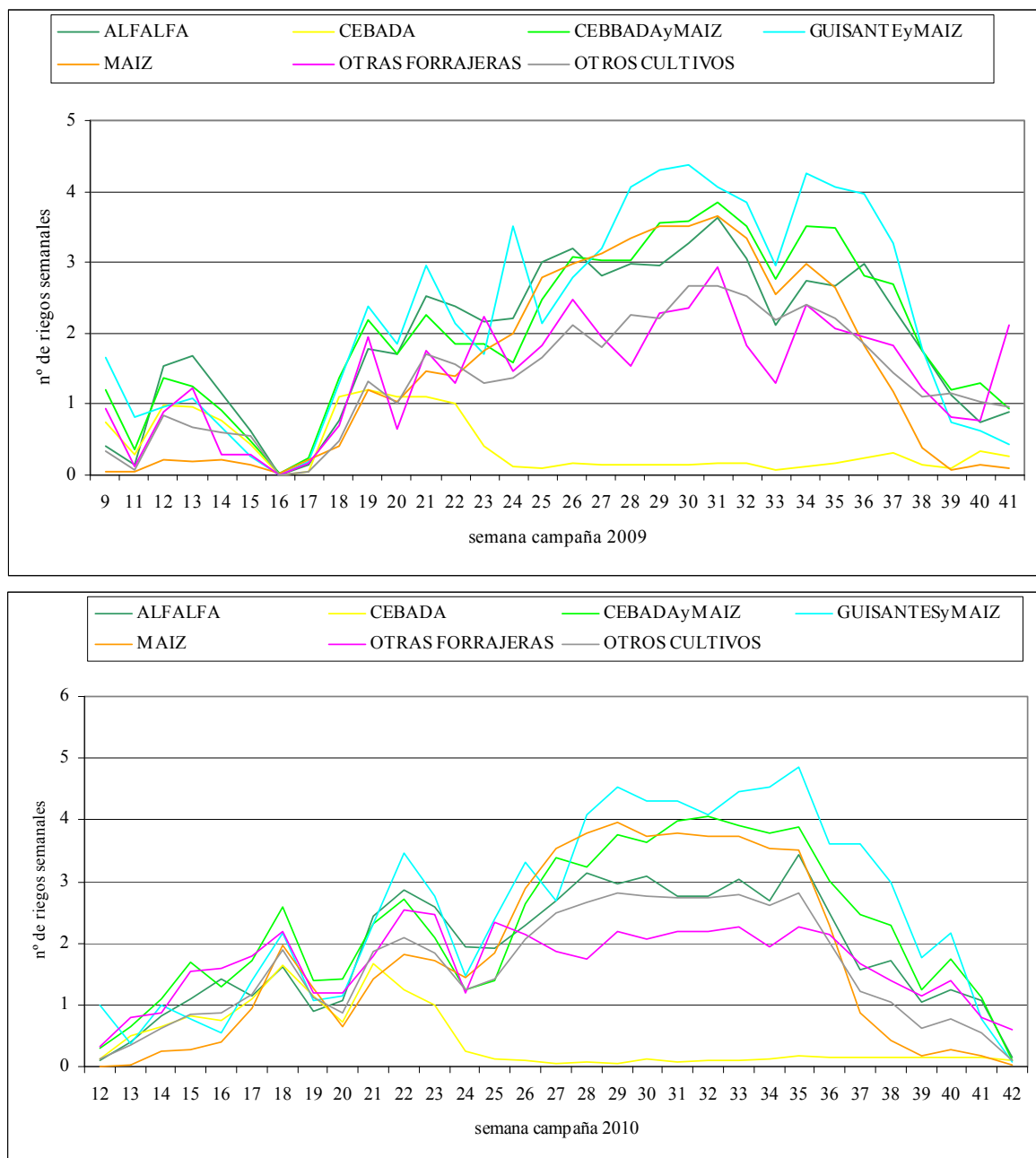


Figura 5.1 Evolución del número de riegos por semana de cada cultivo.

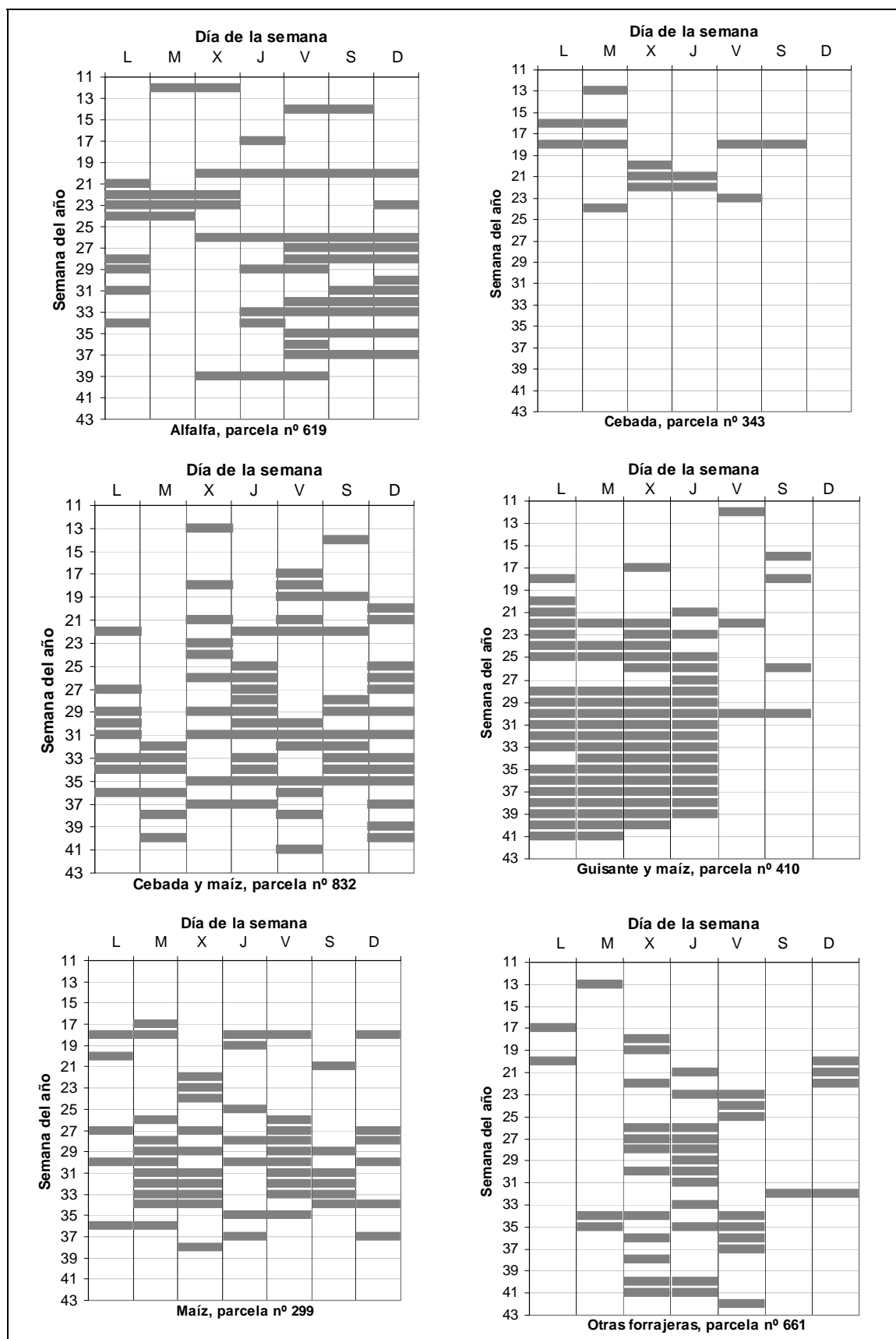


Figura 5. 2. Ejemplos seleccionados de casos de programación de riego actual para los distintos cultivos en LASESA. La línea de color gris indica hidrante en funcionamiento.

La precipitación, influye en la programación del riego, como se representa en la figura 5.3. Se detecta claramente, durante la campaña 2009 y 2010, como hay una disminución del número de hidrantes en funcionamiento tras cada precipitación superior a los 5 mm.

Como ya se ha explicado, los regantes de esta comunidad deben solicitar el agua de riego con cuatro días de antelación, sin posibilidad de cancelación ante un cambio repentino en la meteorología. Por tanto el tiempo de reacción mínimo es de cuatro días. Si llueve durante estos días, el agua pre pagada debe utilizarse o se pierde. Este periodo supera en dos días al detectado por Salvador et al. (2011b) en otra comunidad de regantes de RRAA, situada más al sur, con gestión de agua a la demanda. Se supone que la reciente construcción de una presa capaz de almacenar 10 hm³ probablemente disminuirá este tiempo de respuesta según exponen Delgado y Andrés (2008).

5.3.2 Calidad del riego actual

La relación entre el volumen anual de riego y las necesidades hídricas netas se presentan en la figura 5.4 para: a) Todos las parcelas estudiadas; b) Los principales cultivos agrupados por tipo de CRAD; c) Los tipos de CRAD del suelo y d) Los principales cultivos. En la figura 5.4.a, se aprecian dos grupos: el de la cebada con bajas NHn y el resto de cultivos. Es evidente que la dispersión en los valores de riego es alta. La mayoría de los puntos se encuentran por encima de la línea diagonal, $R=NHn$, indicando que en estos casos se produce un exceso de riego. Los resultados revelan que los mayores riegos se dieron en los suelos con menor CRAD, lo que se confirma en el caso de cultivos de guisantes seguidos de maíz o alfalfa con un valor medio del riego anual que supera los 1000 mm. Por otro lado, el riego medio más bajo también se da en parcelas con suelos de muy baja CRAD con cultivo de cebada. Una posible explicación del exceso de riego puede ser las mayores NHn de cultivos sobre suelos con CRAD muy baja, ya que estos suelos no son capaces de almacenar tanta agua como el resto, como sugiere Cancela et al. (2006). Esto parece conocido por los agricultores de LASESA, que riegan un 12% más, tal y como muestran los valores medios de la figura 5.4.c. Todos los cultivos se encuentran por encima de la línea 1:1, en el lado del exceso de riego. El doble cultivo de guisante y maíz es el que supone el mayor exceso de riego (Fig. 5.4. b y d).

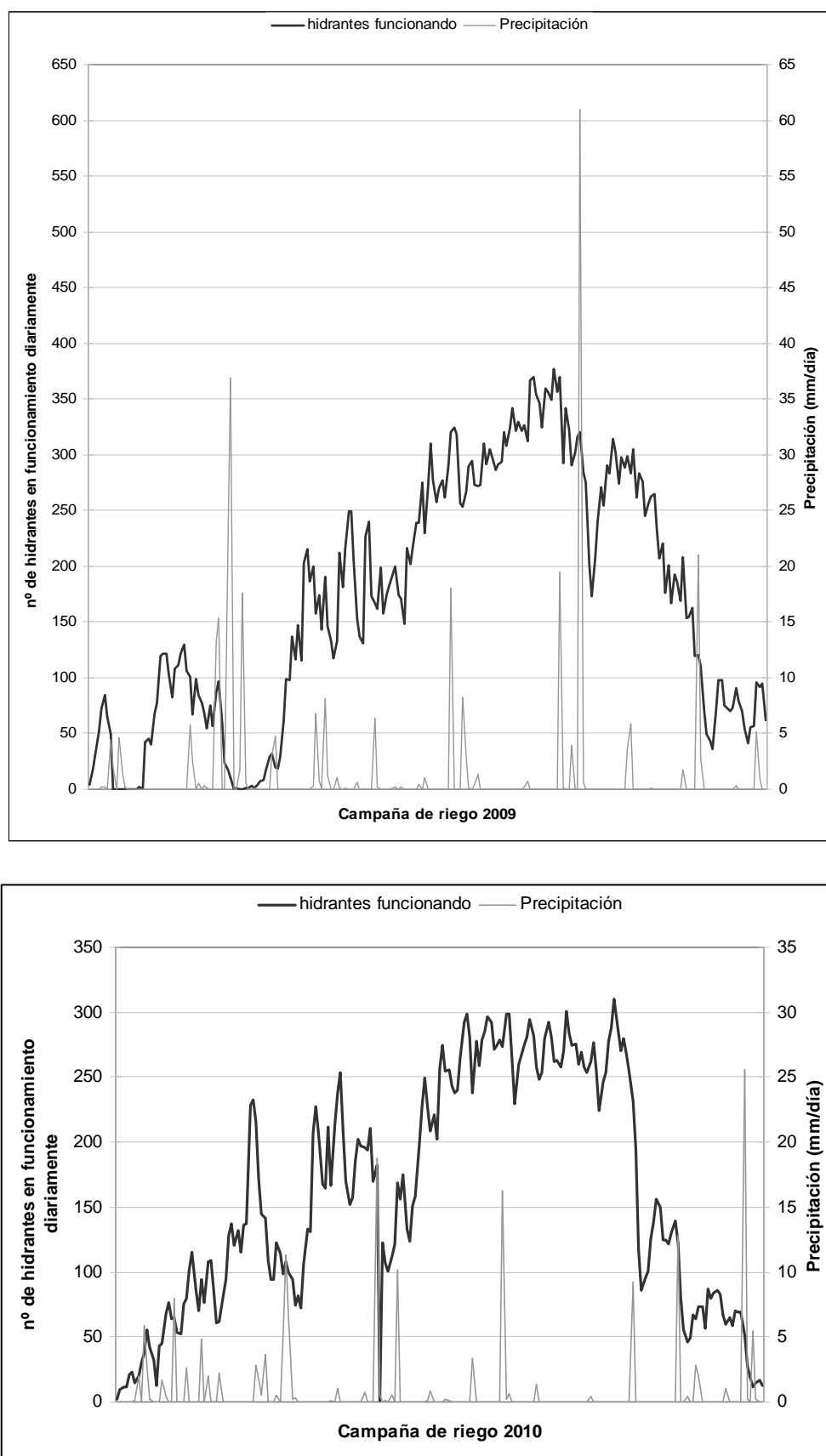


Figura 5.3. Evolución del número de hidrantes funcionando diariamente durante la campaña de riego y la precipitación diaria.

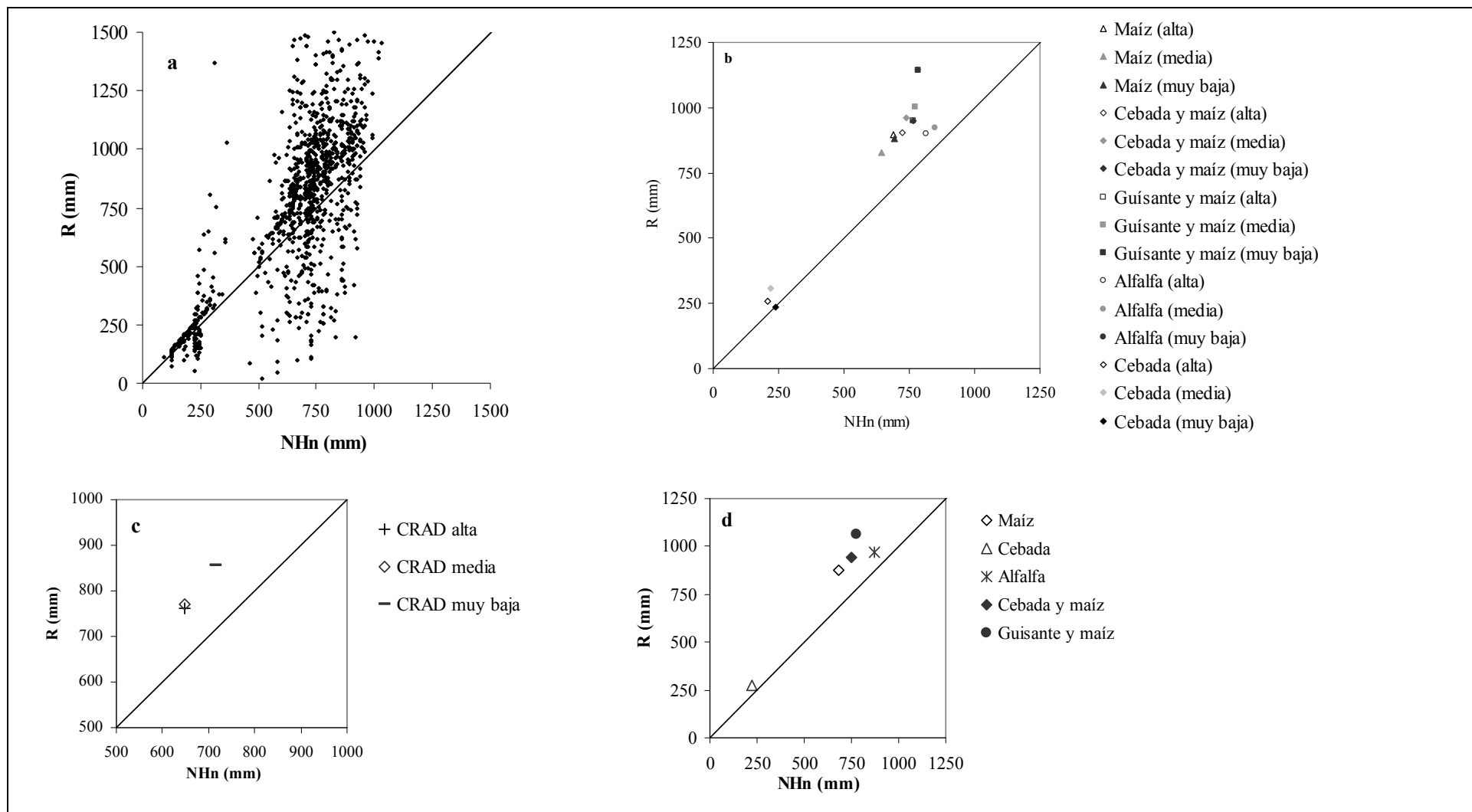


Figura 5. 4 Comparación entre las necesidades hídricas netas (NHn) y riego aplicado (R), teniendo en cuenta: a) todos los datos, b) cultivo y CRAD del suelo, c) CRAD del suelo y d) tipo de cultivo.

El balance diario de agua en el suelo de cada parcela se presenta en el cuadro 5.2. La NHn media de los cultivos fue de 710 mm año⁻¹. El R, 846 mm año⁻¹, fue un 19% superior a la NHn. El riego máximo anual se produce, evidentemente, en las parcelas con doble cosecha de maíz tras guisante (1.075 mm) o cebada (943 mm) y en las de alfalfa (973 mm). Próximos a estos valores, se encuentran los de maíz (872 mm) y otras forrajeras (720 mm). El valor mínimo de riego se produce en las parcelas de cebada (254 mm).

El volumen medio de riego en la LASESA, por unidad de superficie, es mayor que el de otros riegos por aspersión cercanos debido a la mayor proporción de maíz y alfalfa. Estos cultivos ocupan un 84% de la superficie frente al 75% de RRAA, dato presentado por Lecina et al. (2010b). Además en LASESA, el porcentaje de superficie dedicada al doble cultivo, un 26%, también es superior al del resto de las comunidades de regantes de su entorno. Como resultado, sus necesidades hídricas netas son mayores en un 30% a los presentados por Abrahão et al. (2011a) y Skhiri y Dechmi (2012). Los volúmenes de agua aplicados al maíz y la alfalfa son claramente superiores a los utilizados en otras zonas de riego por aspersión del valle del Ebro (Tedeschi et al., 2001; Caverro et al., 2003; Dechmi et al., 2003; Abrahão et al., 2011a; Salvador et al., 2011a; Skhiri y Dechmi, 2011), pero fueron más bajos que los presentados por Zapata et al. (2009). Sin embargo los resultados de riego para la cebada fueron similares a los presentados por los autores mencionados anteriormente.

Para LASESA, se estima que un 12% del riego se pierde por evaporación y arrastre. Otro 12% por drenaje. Al mismo tiempo los cultivos sufrieron un déficit hídrico del 13%. Este valor se incrementó a 19% en el caso de suelos con muy baja CRAD, lo que indica que el agua aplicada no pudo cubrir toda la demanda, como también señalaron Skhiri y Dechmi (2012). Esto llama particularmente la atención ya que como se ha visto anteriormente a estos suelos se les aplica un volumen de agua que es un 12% superior al de los suelos con CRAD media y alta. Dentro de los principales cultivos, la alfalfa tiene el mayor déficit hídrico.

La eficiencia de riego global es del 76% en las dos campañas estudiadas. Destaca la semejanza entre las ER obtenidas en los distintos cultivos. Su rango es escaso ya que oscila entre el 83% para la cebada y el 71% del maíz ambos en el 2009. El valor medio de ER es mayor que los obtenidos en otros riegos por aspersión y con el mismo método de cálculo por Abrahão et al. (2011a) y Skhiri y Dechmi (2012).

Cuadro 5.2. Porcentaje de área, necesidades hídricas netas (NHn), riego (R), eficiencia de riego (ER), fracción de drenaje del riego (FD_R), pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión (PEA) y déficit hídrico (DH) para los cultivos de LASESA.

Campaña	Cultivo	Área (%)	NHn (mm)	R (mm)	ER (%)	FD_R (%)	PEA (%)	DH (%)
2009	Maíz	30	637	871	71	17	12	8
	Alfalfa	29	831	899	78	10	12	14
	Cebada y maíz	19	706	895	76	12	12	11
	Cebada	7	197	199	83	5	11	14
	Guisante y maíz	7	749	1046	73	15	12	8
	Otros cultivos	5	711	680	78	10	12	23
	Otras forrajas	3	700	679	79	9	12	23
	Total		688	831	76	12	12	12
2010	Maíz	32	729	874	74	13	13	13
	Alfalfa	22	918	1047	76	12	12	17
	Cebada y maíz	25	787	990	77	11	12	8
	Cebada	12	237	309	77	13	11	10
	Guisante y maíz	3	837	1104	76	11	12	7
	Otros cultivos	4	789	500	81	6	12	40
	Otras forrajas	3	801	761	78	10	12	19
	Total		733	861	76	12	12	13
2009-10	Total		710	846	76	12	12	13

Como se ha señalado, a partir de la base de datos se han calculado diversos índices. En la figura 5.5 se expone la evolución semanal de la eficiencia de riego y déficit hídrico, a lo largo de las dos campañas de riego y para los principales cultivos.

Se aprecia claramente que el riego evoluciona paralelamente a las necesidades hídricas netas. Esto, junto con los bajos valores de déficit hídrico denota un buen manejo del agua por parte del conjunto de los regantes. A nivel semanal, la eficiencia del riego del cultivo de maíz se mantiene entre el 70 y 80% excepto los descensos puntuales en semanas lluviosas.

En la alfalfa la ER también se mantiene constante con un mejor ajuste del riego a las NHn. Se observa en la figura 5.5 como el riego se adapta a las NHn calculadas teniendo en cuenta las fechas de los cortes. Si al riego de este cultivo se le restan las PEA se tiene un valor que es igual o inferior al de las NHn, manifestando momentos de estrés hídrico, del orden de un 15%. Este resultado se puede interpretar de diversas maneras. Puede ser que algunas parcelas se regaran mal, a destiempo. También pudiera ser que no fueran correctas las fechas de corte. Una posible solución supondría cambiar la programación de riego.

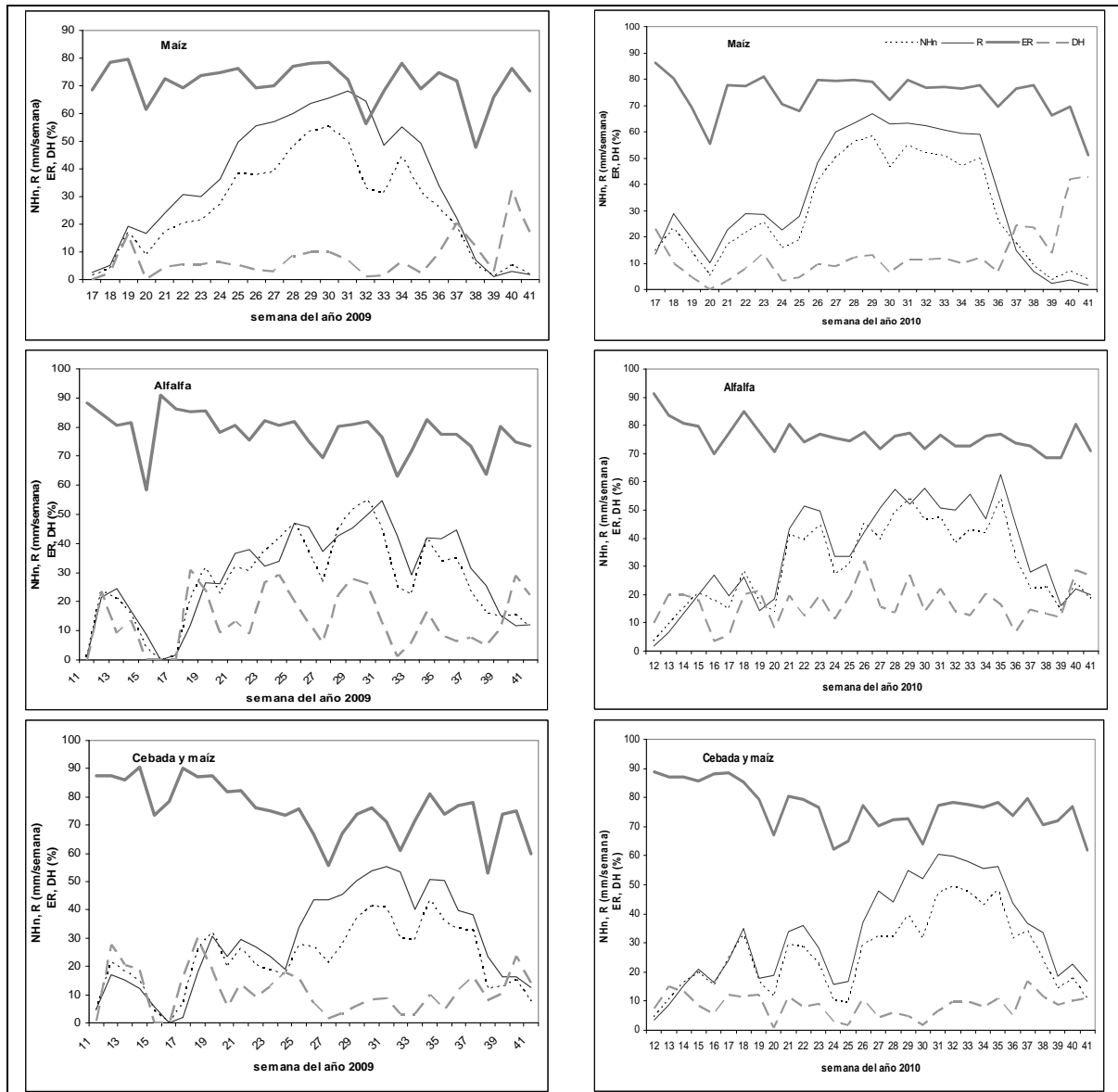


Figura 5.5. Evolución semanal de la eficiencia del riego (ER), déficit hídrico (DH), necesidades hídricas netas (NHn) y riego (R) del maíz, alfalfa y cebada con maíz a continuación durante las campañas de riego del 2009 y 2010 en LASESA.

El índice RIS, cociente entre el riego y las NHn de los cultivos durante toda la campaña de riego, se presenta en la figura 5.6 para los cinco cultivos más importantes en los tres tipos de suelos según la CRAD. Estos cultivos representan el 93% de la superficie estudiada.

La máxima ER en aspersión, descontando sólo las PEAs, sería del 88%, que equivale a un índice RIS de 1,14 ($RIS=1/ER$). En la figura 5.6, se presenta este valor límite como una línea de referencia frente al valor medio de RIS de los diversos casos de cultivos y suelos de LASESA. Como ya se ha señalado, el índice óptimo de RIS es 1. La media del

índice RIS para esta comunidad de riego fue de 1,21 que indica un leve exceso de riego, del orden del 6%. Estos valores la sitúan en la parte más eficiente del amplio rango del índice RIS (0,5-4,16) que caracteriza a los regadíos mundiales (Molden et al., 1998). En otros regadíos por aspersión del valle del Ebro (Cavero et al., 2003; Dechmi et al., 2003; Salvador et al., 2011a y Zapata et al., 2009) se han obtenido valores similares a los de LASESA. Esto sugiere una gestión similar del agua dado que la climatología es, evidentemente, similar.

En la mayoría de los cultivos de LASESA se produce un exceso de riego ya que el valor de RIS fue superior a 1,14. El maíz es un claro ejemplo de riego excesivo con independencia de la CRAD del suelo, siendo sus valores de RIS equivalentes a los descritos por Zapata et al. (2009) y Salvador et al. (2011a) y superiores a los que presentan Cavero et al. (2003) y Dechmi et al. (2003). Por el contrario la alfalfa presenta un déficit de riego similar al detectado por Cavero et al. (2003) pero inferior al estimado por Dechmi et al. (2003). La cebada en suelos con CRAD muy baja es el otro caso de déficit de riego. La variabilidad es alta en todos los cultivos, indicando un diverso manejo del riego.

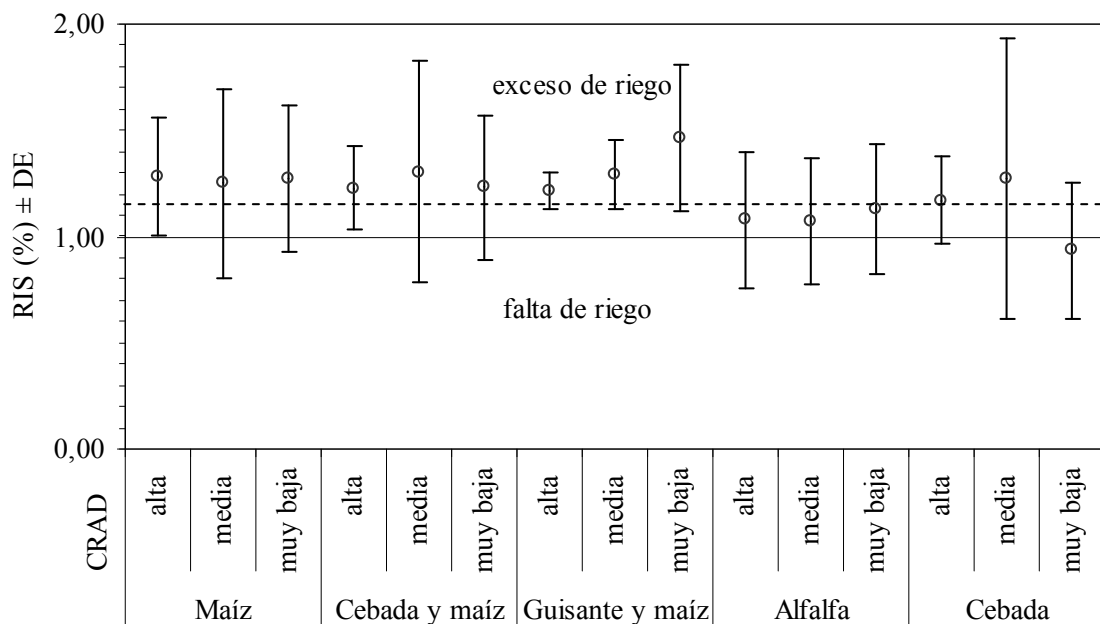


Figura 5.6. Media anual del índice de aprovechamiento riego (RIS). Las barras de error indican \pm desviación estándar (DE) en los diferentes cultivos y tipos de CRAD del suelo.

5.3.3 Propuesta de cambio en la programación de riego

Los resultados de los apartados anteriores ponen de manifiesto que puede mejorarse la actual calidad del riego (76%) en esta comunidad de regantes, mediante cambios en la programación de riego para minimizar los usos no productivos de agua como PEA (12%), y FD_R (12%), en la línea de lo propuesto por Jensen (2007) y otros autores. Por otra parte, la calidad del riego también puede mejorarse adecuando la programación del riego para disminuir el estrés hídrico de los cultivos, que en LASESA alcanza un valor medio del 13%.

La programación de riego es, claramente, una decisión del agricultor, función de su formación e información. Éste, en la actualidad, tiene acceso a información meteorológica, con una buena fiabilidad en un horizonte a tres días vista. Además también tiene acceso a las necesidades hídricas diarias de agua de los cultivos (Oficina del Regante, 2011). Esta información junto con las propiedades hidráulicas del suelo puede permitir optimizar el riego mediante el cambio de la programación de riego.

Una modificación, en relación con la velocidad del viento, consiste en limitar el riego a los periodos con bajas velocidades de viento (Zapata et al., 2007 y 2009). Sin embargo, en LASESA, esta modificación es incompatible con el actual sistema de prepago a cuatro días vista y apertura de hidrantes durante periodos continuos de 24 horas de riego.

En estas condiciones, sin poder limitar las PEAs, la máxima eficiencia de riego alcanzable en LASESA sería del 88%, (100-PEAs), que es un valor muy cercano al máximo del 90% estipulado por Tanji y Kielen (2002) para un riego por aspersión bien manejado. Así pues, la posibilidad de mejora debiera centrarse en minimizar los otros dos parámetros negativos, FD_R y el DH, que también afectan a la calidad del riego.

En base a los criterios indicados, se ha simulado una nueva programación de riego sirviéndose de la base de datos descrita anteriormente (apartado 5.2.2). Para poder llevar a cabo esta programación hay que realizar un balance diario de agua que permita estimar el valor de AU en el suelo de cada parcela. Se propone que se riegue cuando el valor AU en el suelo sea inferior a un valor límite máximo que es la diferencia entre la CRAD y el riego unitario de cada parcela. Como ya se ha explicado, este último parámetro se calcula dividiendo el volumen de agua aplicada diariamente por el área de superficie del campo. En esta propuesta se mantiene el sistema de riego mediante aperturas de hidrante de 24

horas, aunque no se mantiene estrictamente el periodo de cuatro días. Esto supone que el embalse de Lastanosa está en servicio.

Estos riegos teóricos se han simulado para las 523 parcelas y para las campañas de riego de 2009 y 2010. Hay que señalar que el método propuesto no tiene en cuenta el necesario periodo sin riego para la correcta maduración de la cebada, ni el tiempo de secado después del corte de alfalfa, así como los riegos específicos previos y posteriores a la siembra del maíz.

Los ejemplos de estas simulaciones de calendario de riegos se presentan en la figura 5.7 que muestra los resultados de aplicar los nuevos criterios en la programación de riego a los ejemplos de la figura 5.2. Los eventos de riego simulados siguen una distribución más uniforme en el tiempo frente a los reales. Ya no se siguen pautas automáticas de riego semanal, disminuyendo los riegos de varios días consecutivos. A modo de ejemplo, la programación propuesta durante julio y agosto en los tres escenarios de cultivo de maíz es muy parecida porque tienen las mismas necesidades de agua. Esto no sucedía en los ejemplos de la figura 5.2.

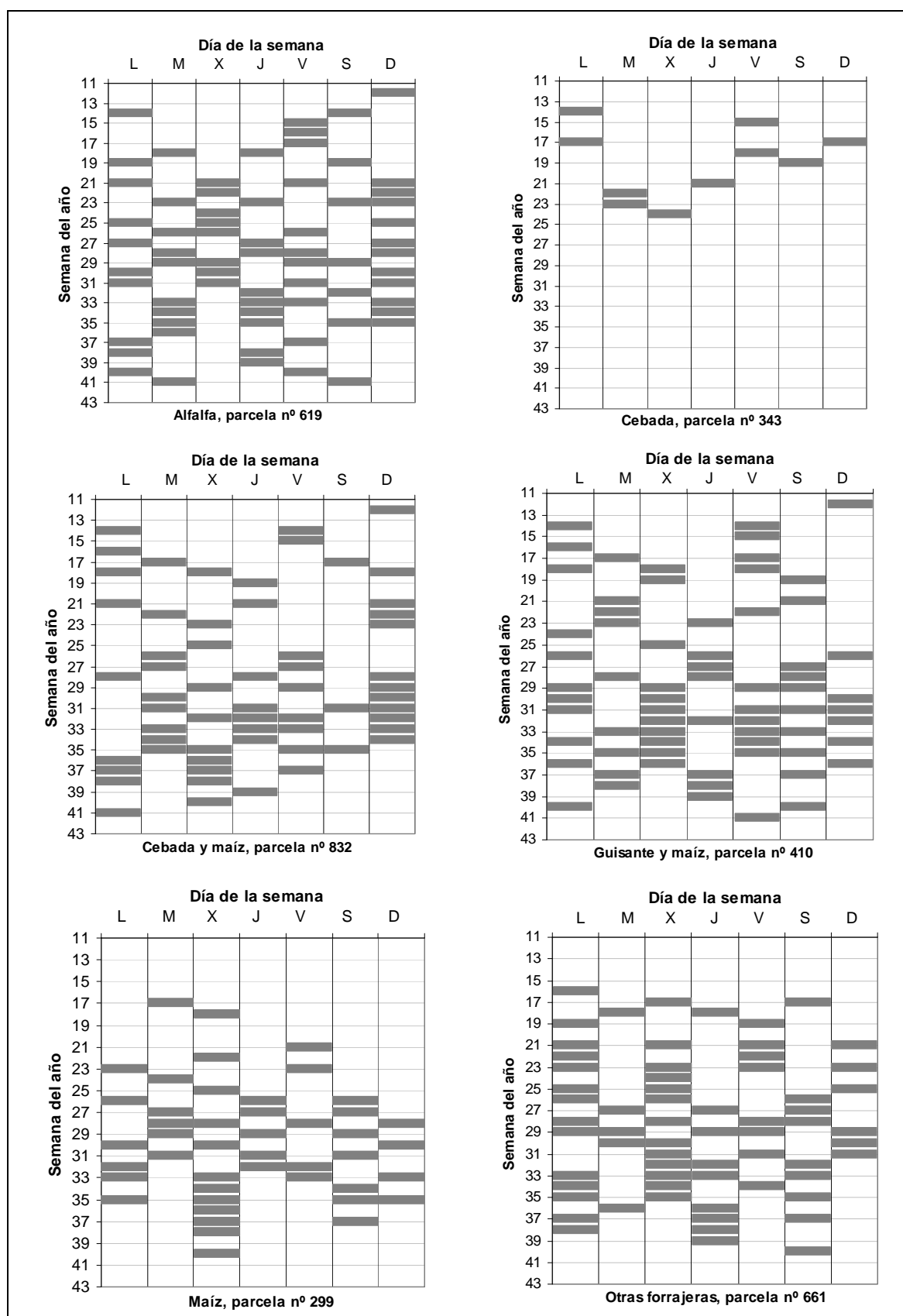


Figura 5.7. Simulación con optimización de gestión en parcelas seleccionadas en LASESA. La línea de color gris indica funcionamiento del hidrante.

5.3.4 Calidad del riego de la nueva de programación

La comparación entre las NHn y los valores simulados de riego se presenta en la figura 5.8. Los nuevos datos, producto de la simulación, son manifiestamente menos dispersos y se agrupan en una distribución lineal y ligeramente divergentes de la diagonal 1:1. La práctica totalidad de los puntos se encuentran por encima de la línea diagonal con un ligero exceso de riego, necesario para cubrir las PEA. Los escasos valores no agrupados se corresponden con parcelas cuya dotación de riego diaria es superior a la CRAD del suelo. Estos se podrían agrupar haciendo que sus tiempos de riego fueran menores de 24 horas. Sin embargo son casos minoritarios que obligarían a cambiar la gestión actual de LASESA. Las gráficas muestran además, que se han reducido las diferencias en el volumen de riego entre los suelos de muy baja CRAD y el resto (Figura 5.8 c). Esto indica que con una programación de riego adecuada no es necesario aplicarles una mayor dosis de riego y, además permitirá disminuir la fracción de drenaje especialmente de estos suelos con muy baja CRAD. El cuadro 5.3 muestra los resultados globales de riego propuesto por la simulación con sus nuevos índices de calidad. En la simulación, el volumen de riego ha aumentado un 7% respecto al riego actual. Esto es debido a que ahora el DH es prácticamente nulo frente al 13% de la situación real. Según lo predicho por Lecina et al. (2010a), este aumento en el consumo de agua es efecto del cambio en la programación del riego para lograr una mayor productividad. Sin un cambio de gestión, de riego por vales a riego a la demanda, es inevitable que el 12% del agua de riego siga perdiéndose por evaporación y arrastre. Sin embargo, con la programación propuesta, se reducen las pérdidas por drenaje en un 8%. La eficiencia de riego global alcanza el 83% con un rango entre 80% al 85% para los distintos cultivos. El aumento de la frecuencia de riego se nota especialmente en los suelos de baja CRAD donde disminuiría la fracción de drenaje o el déficit hídrico. En el primer caso supone un ahorro de agua y en el segundo un aumento de la producción en la línea de lo propuesto por Pandey et al. (2000), Playán y Mateos (2005b) y Farré y Faci (2009).

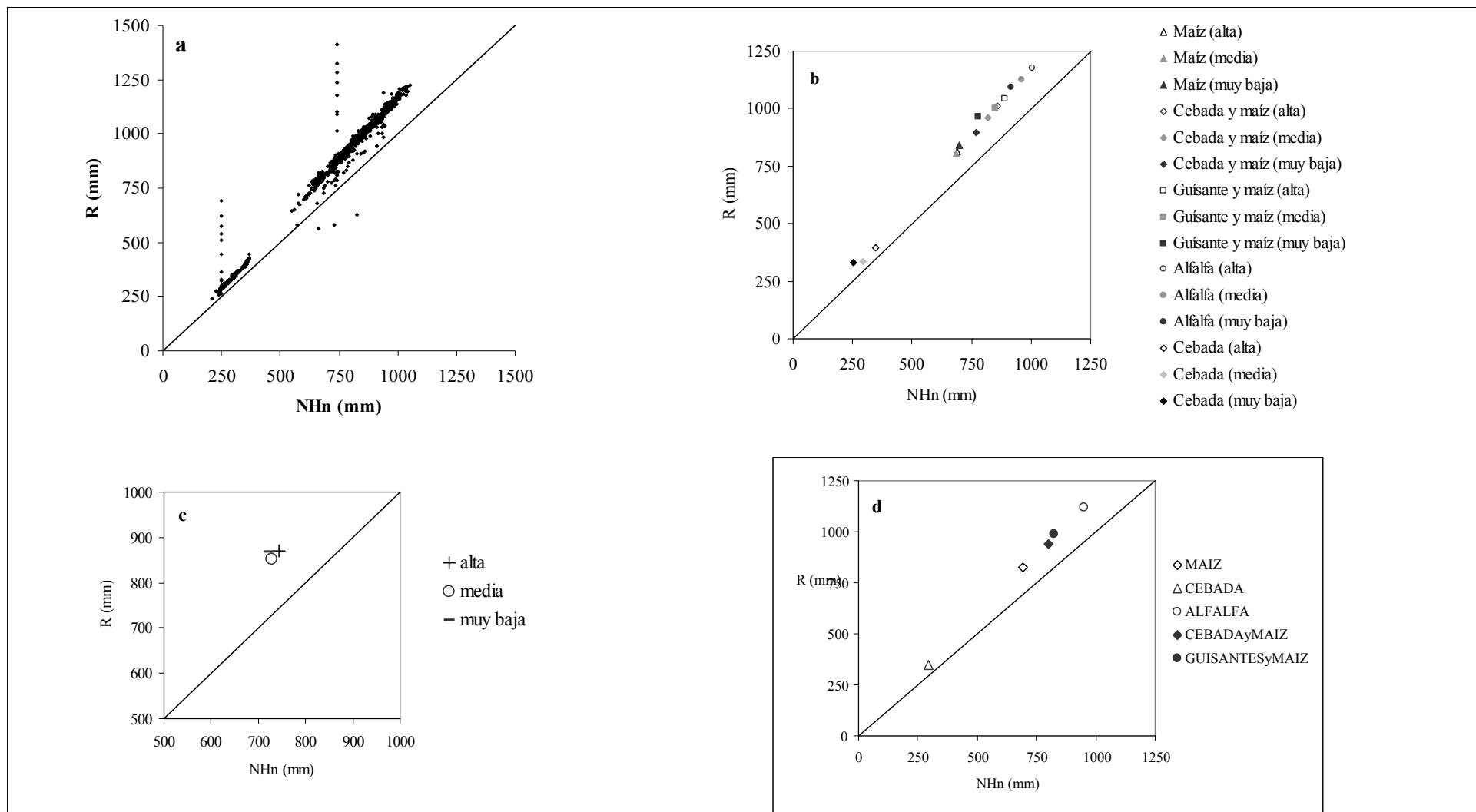


Figura 5. 8. Comparación entre NHn y el riego simulado (R), teniendo en cuenta: a) todos los datos, b) el cultivo y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (CRAD), c) la CRAD del suelo y d) el cultivo con la nueva propuesta de programación del riego.

Cuadro 5. 3. Riego (R), eficiencia de riego (ER), fracción de drenaje del riego (FD_R), pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión (PEA) y déficit hídrico (DH) para los cultivos de LASESA regados según una programación de riego simulada.

Campaña	Cultivo	Área (%)	R (mm)	ER (%)	FD_R (%)	PEA (%)	DH (%)
2009	Maíz	30	782	85	2	13	0
	Alfalfa	29	1093	82	6	12	0
	Cebada y maíz	19	913	82	6	12	0
	Cebada	7	344	85	3	12	0
	Guisante y maíz	7	942	83	5	12	0
	Otros cultivos	5	997	84	4	12	0
	Otras forrajeras	3	971	83	5	12	0
	Total		893	83	4	12	0
2010	Maíz	32	871	83	4	13	1
	Alfalfa	22	1151	85	3	12	1
	Cebada y maíz	25	960	84	3	12	0
	Cebada	12	350	84	5	11	1
	Guisante y maíz	3	1091	80	5	12	0
	Otros cultivos	4	1093	84	3	13	1
	Otras forrajeras	3	974	84	3	12	2
	Total		909	84	4	13	1
2009-10	Total		901	83	4	12	0

La evolución del riego propuesta por la simulación y sus índices de calidad se muestran en la figura 5.9 para los principales cultivos. La eficiencia del riego del maíz y alfalfa se mantiene ahora más constante y se sitúa entre el 80 y 90% a la largo de la campaña de riego. Como se han utilizado los datos climatológicos reales de las campañas 2009 y 2010, y el método no conoce la lluvia a futuro, se observa una disminución de eficiencia en semanas lluviosas. En estas, el índice disminuye más que en la realidad, dado que con el criterio planteado se mantiene el suelo cerca de capacidad de campo. Un aporte de agua complementario por la lluvia induce un claro descenso de eficiencia. Por último, se observa que con esta nueva programación el riego se adapta mucho mejor a las necesidades hídricas netas y no existe déficit hídrico.

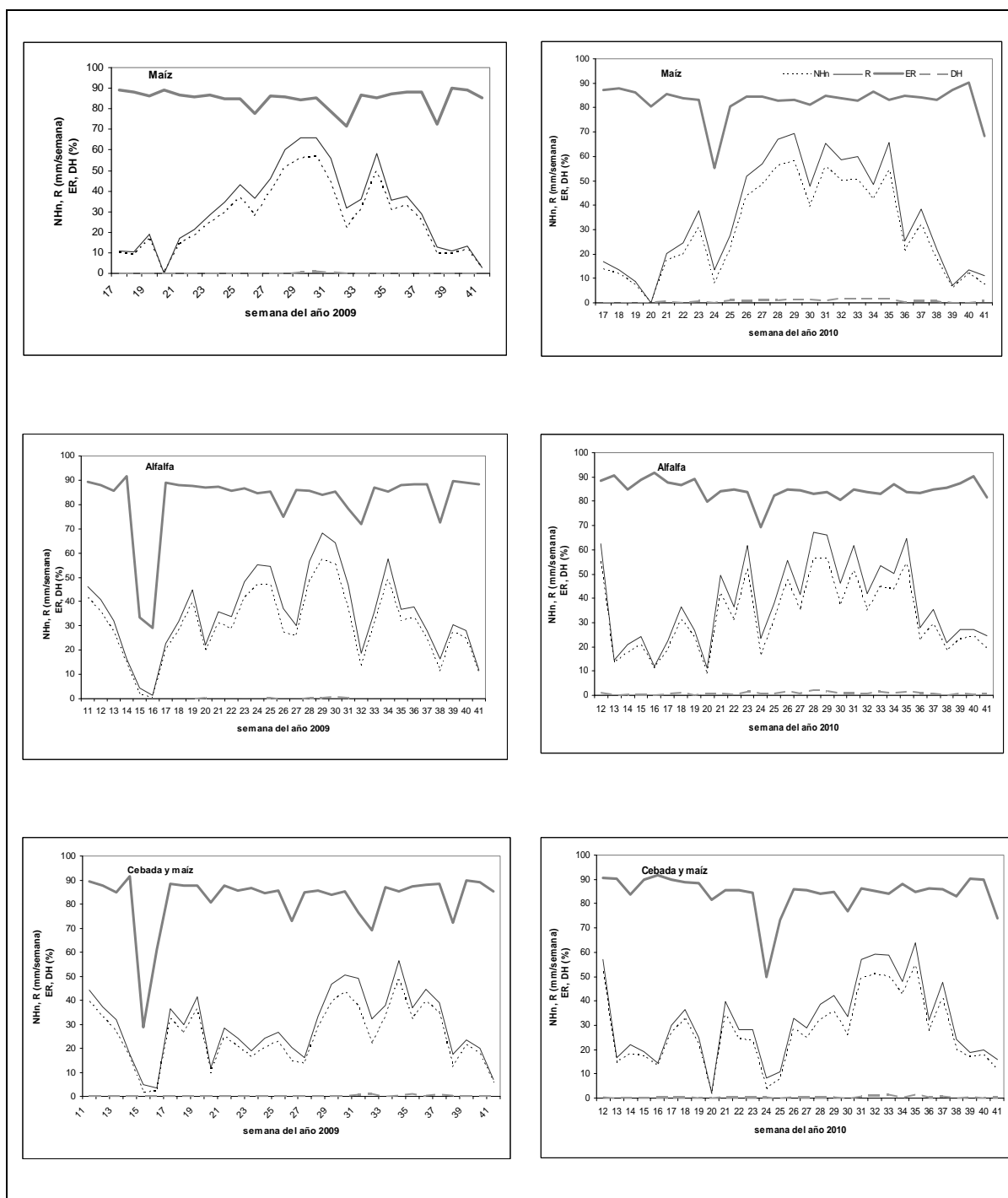


Figura 5.9. Evolución semanal de la eficiencia del riego (ER), déficit hídrico (DH), necesidades hídricas netas (NHn) y riego (R) del maíz, alfalfa y cebada con maíz con la programación de riegos propuesta, durante las campañas de riego del 2009 y 2010.

5.4 Conclusiones

El volumen de riego aplicado en la LASESA es un 19% superior a las necesidades hídricas netas de los cultivos. Este volumen de riego anual, 846 mm, es superior a la mayoría de las zonas de riego por aspersión del valle del Ebro debido a su mayor porcentaje de maíz, alfalfa y doble cultivo.

El riego máximo anual se produce, evidentemente, en las parcelas con doble cosecha de maíz tras guisante (1.075 mm) o cebada (943 mm) y en las de alfalfa (973 mm). Próximos a estos valores, se encuentran los de maíz (872 mm) y otras forrajeras (720 mm). El valor mínimo de riego se produce en las parcelas de cebada (254 mm).

El riego global evolucionó paralelamente a las necesidades hídricas netas, indicando que el conjunto de los regantes adaptan el riego a la evolución del cultivo y del clima durante la campaña de riego.

La eficiencia media del riego en LASESA es del 76%. Se estima que el 12% del riego se pierde por evaporación y arrastre y otro 12% por drenaje. Esta eficiencia de riego es la mas alta, de las calculadas con este método, en el valle del Ebro.

El rendimiento del riego, según el índice RIS, fue del 1,21. El exceso del riego es sólo del 6%. No obstante este índice no puede detectar el déficit hídrico, que fue del 13%.

Los cultivos situados en suelos de menor capacidad de almacenamiento de agua se riegan un 12% más que los implantados sobre el resto de suelos. Sin embargo, sufren un déficit hídrico superior a la media.

Los riegos a nivel de parcela son más heterogéneos de lo esperado, en una comunidad de regantes donde prácticamente solo hay tres cultivos extensivos (maíz, alfalfa y cebada). Gran parte de los regantes siguen un patrón fijo, regando siempre en los mismos días de la semana. Además, la mitad de los eventos de riego se aplicaron en días consecutivos, con las consecuentes pérdidas por drenaje en suelos con muy baja capacidad de almacenamiento de agua.

Para mejorar la eficiencia del riego se puede modificar la programación del riego, de manera que se reduzca el drenaje y el déficit hídrico. Se propone un cambio consistente en regar en función del contenido de agua en el suelo y se simulan sus efectos. Los resultados muestran que la programación de riego basada en el balance de agua diario no siguen unas pautas automáticas de riego semanal, disminuyendo los riegos de varios días consecutivos. Además, esta programación permite ajustar el riego a las necesidades de los cultivos sin variar substancialmente la gestión actual de LASESA. El criterio escogido para decidir el día de riego es sencillo, reduce la alta variabilidad de la programación actual y mejora la calidad del riego, hasta alcanzar una eficiencia teórica del 83%. Con la nueva programación, no es necesario aplicar una mayor dosis de riego en los suelos con baja capacidad de almacenamiento. Las pérdidas por drenaje se reducen en un 8% y no existe déficit hídrico. Sin embargo el volumen de riego tiene que incrementarse en un 7%.

6 Balance hidrológico

6.1 Introducción

En las zonas áridas y semiáridas del planeta, la escasez de agua es un problema que se está acrecentando por un incremento en las demandas. En casos extremos esto exige la difícil labor de priorizar los usos más útiles para la sociedad. Para abordar esta delicada tarea, se necesita diagnosticar adecuadamente la magnitud del problema mediante una adecuada contabilidad del agua.

En la mayoría de zona semiáridas, la agricultura de riego es el mayor usuario de agua (FAO, 2007; Calzadilla et al., 2008; Oweis y Hachum, 2012). Por tanto, es evidentemente la necesidad de optimizar la utilización del agua de riego (Comín, 1999; García-Vera, 2012). Una herramienta adecuada son los balances de agua como un modelo de contabilidad que facilita la asignación de los usos del agua (Molden, 1997). Los balances se pueden realizar a diferentes escalas, desde nivel de parcela hasta nivel de cuenca hidrológica. Es evidente que cada uno de ellos tiene sus ventajas e inconvenientes, tanto teóricos como prácticos.

Se estima que en la cuenca del río Ebro, el regadío utiliza el 86% del agua captada (CHE, 1996). Por este motivo se han elaborado diversos estudios basados en balances de agua, tanto sistemas de riego por superficie (Faci et al., 1985; Causapé et al., 2004a; Isidoro et al., 2004; Barros et al., 2011), como en riego por aspersión (Tedeschi et al., 2001; Cavero et al., 2003; Abrahão et al., 2011a; Skhiri y Dechmi, 2012). Estos últimos se han realizado en distritos con pocos años de transformación por lo que es posible que no se hubiera alcanzado todavía un estado estacionario.

La comunidad de regantes de LASESA es una zona adecuada para este tipo de estudios, ya que el riego por aspersión lleva más de 30 años en funcionamiento. Por ello, se decidió abordar su estudio mediante la realización de balances hidrológicos en sus principales cuencas de drenaje, apoyados sobre balances a nivel de parcela. En los balances a nivel de cuenca es necesario tener en cuenta la existencia del acuífero en la grava de las terrazas.

6.2 Metodología

6.2.1 Delimitación de cuencas

Los siete principales colectores de drenaje de LASESA se identificaron a partir de la información proporcionada por la comunidad de regantes, complementada con varias visitas de campo para seleccionar los puntos de aforo. Como ya se ha señalado, la mayor parte de los colectores son naturales. El resto, como el gran colector entre los sectores XXXI-1ª y XXXI-2ª, se abrieron durante la transformación a regadío.

Las divisorias de aguas de las cuencas de los colectores se delimitaron mediante la extensión Hydrotools de ArcGis 9.2, sobre un modelo digital del terreno, asumiendo que las divisorias de aguas subterráneas coinciden con las superficiales. La excepción es el gran colector, ya mencionado, cuya cuenca subterránea se ha establecido teniendo en cuenta la red de drenajes, principales y secundarios, construidos en la transformación a regadío.

Las características, usos del suelo y datos de riego, por cuencas, se han establecido a partir del mapa parcelario del SIGPAC con la misma metodología que para el conjunto de la comunidad de regantes. Hay que señalar que en las diversas cuencas aparecen zonas de secano y también áreas no cultivadas situadas en la zona de regadío.

6.2.2 Balance hidrológico de las cuencas

Los balances hídricos son herramientas clásicas utilizadas para analizar el uso del agua. En el presente capítulo, se han realizado dos balances hídricos a dos escalas y metodologías diferentes.

El nivel básico de balance hidrológico, de uso común en agricultura, es la parcela de cultivo como una unidad de gestión. La zona radicular es el límite en profundidad del balance. A esta escala, no se considera la existencia de aguas subterráneas. En el capítulo anterior se ha realizado el balance diario de agua por parcela, estimándose los valores de ET_R , el incremento de agua almacenada en el suelo (ΔS) y el volumen drenado por el suelo (D_S).

El segundo nivel, utilizado ampliamente en hidrología, es la cuenca, cuyos flujos de entradas y salidas se muestran en la figura 6.1. La cuenca está compuesta por parcelas regadas, parcelas de secano y zonas no cultivadas tanto en secano como en regadío. Además, a este nivel, hay que tener en cuenta la existencia del acuífero que recoge las aguas que drenan, a nivel de parcela, más allá de la zona radicular. El acuífero, a su vez, descarga en los drenes colectores.

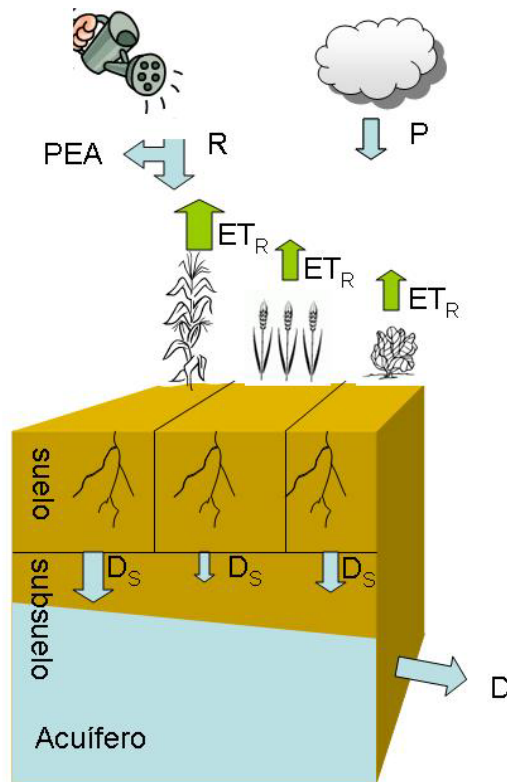


Figura 6.1. Esquema conceptual del sistema cuenca y sus flujos de entrada y salida de agua

Por agregación de los datos de las parcelas contenidas en cada cuenca se realiza el balance por cuencas entre noviembre del 2008 y octubre del 2010. Como ya se ha señalado en el capítulo anterior, siguiendo la metodología de Causapé (2009a), se realiza una distribución de P y R entre la ET_R , PEA , D_s y ΔS . Las pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión se estimaron según Playán et al. (2005a). Al desconocer el volumen de agua almacenada en el suelo al inicio del estudio, se asume que el contenido de agua en esta fecha era igual a la mitad de la CRAD. En el balance de cuenca hay que incluir los datos correspondientes a las parcelas de secano y la superficie no cultivada situada dentro de cada cuenca.

Para realizar el balance por cuencas es necesario determinar, además, tres nuevos parámetros. El primer parámetro está relacionado con los vertidos de agua sobrante del canal de Pertusa (C) dado que, hoy día y esporádicamente, LASESA se ve obligada a verter agua sobrante al barranco de los Arnales. Se ha estimado como la diferencia diaria entre el agua facturada por la CHE y el agua consumida por la comunidad de regantes.

El segundo parámetro es el incremento de agua almacenada (ΔA) en el acuífero principal formado en la grava de las terrazas. Como ya se ha indicado, este ΔA se estimó tomando como base el área de las terrazas dentro de cada cuenca, los cambios en el nivel del agua subterránea registrados en el pozo de observación y una porosidad efectiva del 10%. Como primera hipótesis, se asume que no existe una importante percolación subterránea profunda través de los materiales del Mioceno.

El tercer parámetro es el drenaje real medido (D) en los barrancos o colectores. Los caudales de drenaje se han determinado de forma puntual en siete puntos de aforo seleccionados y que se presentan en la figura 6.3. En dos puntos (C6 y C7) se ha realizado un aforo volumétrico. En otros cinco puntos se ha aforado mediante minimolinete de eje horizontal OTT-C2, utilizando el método de las secciones centradas según Quiñones y Guzmán (1986). Durante 2008 el aforo en todos los puntos fue manual con frecuencia aproximadamente quincenal. En abril de 2010 se puso en funcionamiento un aforador Parshall en el punto C4, con una garganta de 12 pulgadas y un medidor de nivel Thalimedes que recolecta los datos con una frecuencia de 15 minutos (Figura 6.2). En el resto de los puntos se mantuvo un aforo manual. Los volúmenes de agua drenada por cada cuenca se calculan multiplicando los caudales aforados por el tiempo asignado a cada aforo.



Figura 6. 2. *Aforador en barranco de Malfarás. Cuenca C4.*

El balance hidrológico de cada cuenca se realiza a partir de los volúmenes asociados a los flujos de entrada ($E=P+R+C$), salida ($S=ET_R+D+PEA$) y almacenamiento ($A=\Delta S+\Delta A$) del sistema cuenca (figura 6.2).

La bondad del balance se comprueba mediante el error del balance que se calcula en términos porcentuales como $200 \cdot [(E-S-A) / (E+S+A)]$. También se realiza una segunda comprobación que consiste en hacer un balance del flujo de agua en el acuífero. En éste sólo se considera una entrada, la proveniente del agua drenada por el suelo (D_s), y una salida que es el agua aforada a la salida de cada cuenca (D).

6.2.3 Índices de uso de agua

La evaluación del uso del agua se realiza según una contabilidad donde hay que determinar el destino de los diferentes flujos de salida del sistema (Lecina et al., 2009):

- La evapotranspiración productiva (ET_p), que se corresponde con la ET_R de los cultivos.
- Se denomina evapotranspiración no productiva (ET_{np}) a la ET_R de las superficies sin cultivo y a las PEA.
- La escorrentía/percolación se corresponde con el drenaje. Puede ser reutilizable (E/Pr) o no reutilizable (E/P_{nr}) dependiendo de la escala espacial que se aplique y de la calidad del agua de drenaje. A escala de LASESA, esta agua prácticamente hoy no se reutiliza y se considera como no recuperable. A escala de la cuenca del Ebro, el agua de drenaje de la LASESA retorna al río Alcanadre y puede ser reutilizada. Por lo tanto se ha considerado como reutilizable en el presente trabajo.

A partir de los parámetros anteriores se definen diversos índices hidrológicos, relacionados entre sí mediante las siguientes expresiones:

$$FC = (V_{ET_p} + V_{ET_{np}} + V_{E/P_{nr}}) / V$$

$$FR = V_{E/Pr} / V$$

$$FPC = V_{ET_p} / (V_{ET_p} + V_{ET_{np}} + V_{E/P_{nr}})$$

Donde FC es la fracción consuntiva (%), V_{ETp} es el volumen de la evapotranspiración productiva, V_{ETnp} es el volumen de la evapotranspiración no productiva, $V_{E/Pnr}$ es el volumen de la escorrentía/percolación no recuperable, FR es la fracción recuperable (%), $V_{E/Pr}$ es el volumen de la escorrentía/percolación recuperable, V es el volumen de agua total disponible, y FPC es la fracción productiva consuntiva (%).

6.3 Resultados y discusión

6.3.1 Delimitación de cuencas

A partir de la metodología indicada se han delimitado siete cuencas dentro de LASESA que se presentan en la figura 6.3. Hay que indicar que en el sistema de Riegos del Alto Aragón, los canales marcan el límite altitudinal del regadío ya que no se riegan las parcelas situadas por encima de la cota del canal. El canal de Pertusa discurre de norte a sur paralelo al río Alcanadre. En la zona de LASESA, bordea la plataforma del saso de las Fitas, de modo que el territorio situado a su margen izquierda tiene mayor elevación y por tanto es de secano y el regadío se sitúa al oeste del canal.

La delimitación de cuencas incluye zonas no regadas, de secano, situadas por encima de la cota del canal de Pertusa, aspecto que es interesante tener en cuenta a efectos de la interpretación de resultados. Las siete cuencas abarcan 452 parcelas, que suponen el aproximadamente dos terceras partes del territorio gestionado por LASESA. En la zona norte, sector XXIX, la accesibilidad de los puntos de aforo condicionó la superficie de la cuenca útil. Hay que señalar que en este sector existe un porcentaje alto de zonas no cultivadas. El resto de la zona no aforada carece de drenajes de entidad y el agua subterránea drena directamente al río Alcanadre o aflora en rezumes no aforables.

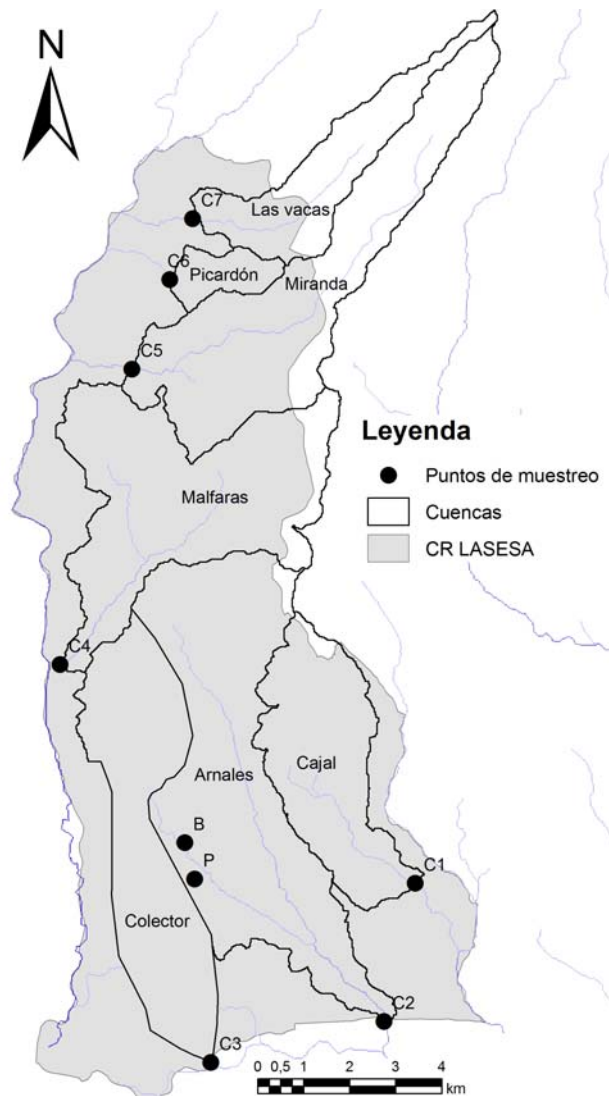


Figura 6.3. Mapa de las cuencas y puntos de aforo en LASESA

Los resultados de la caracterización por cuenca se presentan en el cuadro 6.1. El porcentaje de superficie regada es alto (68%) en las cuencas que no tienen prácticamente superficie por encima del canal (C1, C2, C3, C4 y C6). Por el contrario es bajo (20%) en las cuencas C5 y C7 que tienen la mayor parte de su superficie en secano. La información recogida en el mapa de CRAD de LASESA (figura 4.8) se ha distribuido en las cuencas delimitadas. Esto permite, en principio una diferenciación por cuencas en cuanto al tipo de suelo. Así, en las cuencas C2 y C3 predominan los suelos de muy baja CRAD. Las cuencas C1 y C4 presentan suelos de CRAD media y en las cuencas del norte (C5, C6 y C7) los de CRAD alta.

Cuadro 6.1. Caracterización de las cuencas por superficies totales, regadas y CRAD.

	Cuencas							Total
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	
	Superficie (ha)							
Cuenca	1.182	2.418	1.523	1.972	1.886	215	785	9.980
Regadío	623	1.619	1173	1397	413	146	111	5.483
	Representación por tipo de CRAD (%)							
Muy baja (<64 mm)	0	59	83	31	21	2	0	45
Media (64-190 mm)	61	22	17	54	18	26	0	33
Alta (>190 mm)	39	18	0	15	61	72	100	22
CRAD media (mm)	169	89	47	114	171	201	230	107

Se ha recalculado el uso del suelo abarcado por el conjunto de cuencas estudiadas. Los resultados se presentan en el cuadro 6.2. En éstas, los cultivos mayoritarios siguen siendo maíz, cebada y alfalfa. En el 27% de la superficie de regadío se producen dos cultivos por año. Así, el 47% del maíz se produce como un segundo cultivo sembrado tras la cosecha de cultivos de invierno como la cebada y los guisantes. Este porcentaje de doble cosecha define a esta comunidad como una de las más productivas dentro de los regadíos del Alto Aragón. El doble cultivo está más extendido en las cuencas de menor CRAD que coinciden con las de mayor superficie regada (C2, C3 y C4). En los dos años estudiados se ha observado una disminución de las leguminosas (alfalfa y guisante) en favor de los cereales (cebada y el maíz). Por cuencas, se aprecian diferencias en el porcentaje de superficie de doble cultivo. En las cuencas C2, C3 y C4 este porcentaje es más alto, entre 25 y el 35% del total, que en el resto. Sin tener una explicación fehaciente, pudiera deberse a que una mayor temperatura media de estos suelos, de mayor pedregosidad y textura más gruesa acelera la maduración de los cultivos de invierno y favorece un segundo cultivo de verano. El riego medio, recalculado, se sitúa en torno a los 800 mm al año. Las parcelas más regadas fueron las dedicadas a alfalfa y a doble cultivo. Por el contrario, las menos regadas fueron las de cebada. Por cuencas se aprecian algunas diferencias en el riego aplicado a un mismo cultivo. Por ejemplo hay 2000 m³ ha⁻¹ de variación entre el consumo de agua para el maíz entre C3, típica de suelos de baja CRAD, y C6, típica de suelos de alta CRAD (Cuadro 6.2). Esto parece contradecir las conclusiones derivadas en el capítulo anterior, donde se afirma que las parcelas de menor CRAD reciben más agua. Pero hay que tener en cuenta que la cuenca C6 figura entre las de menor superficie. En este sentido, es posible que sea un problema de tipo estadístico.

Cuadro 6.2. Superficie y riego medios de cada cultivo en el regadío incluido en las siete cuencas de LASESA durante los años 2009 y 2010.

	Cuencas							Total		
								Campana		Media
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	2009	2010	2009-10
Superficie (ha)										
Maíz	157	427	362	385	191	65	70	1.606	1.709	1.658
Alfalfa	129	328	338	457	96	20	28	1.626	1.167	1.397
Cebada y maíz	100	497	304	288	19	24	9	1.097	1.385	1.241
Cebada	101	215	54	121	47	27	4	410	729	569
Guisante y maíz	16	63	62	67	7	0	0	344	88	216
Otras forrajeras	42	47	44	40	7	0	0	180	181	180
Otros cultivos	78	41	8	39	47	9	0	217	227	222
Total regadío	623	1.619	1.173	1.397	413	146	111	5.480	5.486	5.483
Riego (mm)										
Maíz	824	836	771	775	837	995	812	813	812	812
Alfalfa	833	873	955	1019	804	1021	755	887	995	941
Cebada y maíz	995	965	812	798	1.047	966	757	846	927	886
Cebada	292	294	248	257	328	246	231	256	296	276
Guisante y maíz	896	1042	990	895	936	0	0	943	1.059	1.001
Otras forrajeras	720	809	731	713	471	0	0	753	717	735
Otros cultivos	491	479	894	768	458	684	0	623	489	556
Total	720	809	822	819	734	837	770	798	799	799

6.3.2 Agua aforada por cuencas de drenaje

Los caudales medidos en los 7 puntos de muestreo entre noviembre de 2008 y diciembre de 2010 se muestran en la figura 6.4. En general son caudales modestos, proporcionales a la superficie regada. En todas las cuencas, el caudal del drenaje aumenta con el inicio de la temporada de riego y los máximos se alcanzan en agosto-septiembre. Esto confirma que la cantidad de agua circulante por los colectores depende fundamentalmente del riego. Éste es el principal regulador del régimen hídrico de las cuencas tal y como ocurre en otras muchas zonas semi-áridas del planeta (Dougherty et al., 1995; Schoups et al., 2005; Liu et al., 2010). La evolución posterior a la finalización de la campaña permite diferenciar dos grupos.

Un primer grupo estaría formado por las cuencas C2, C3 y C4 que son las que tiene mayor caudal medio, 214, 112 y 114 L s⁻¹ respectivamente. En sus hidrogramas se observa que el efecto del riego es apreciable entre 1 y 2 meses tras finalizar la temporada. Incluso se puede detectar muy levemente hasta el principio de la siguiente temporada de riego.

Las cuencas del segundo grupo se caracterizan por tener un caudal muy bajo (41, 27, 4 y 4 L s⁻¹ para C1, C5, C6 y C7 respectivamente). La influencia del riego una vez

finalizada la campaña, desaparece con rapidez y parecen responder con mayor intensidad a los episodios de lluvia.

Las primeras cuencas se sitúan, fundamentalmente sobre las terrazas. El agua infiltrada recarga el acuífero situado en la grava de las terrazas tal y como se muestra en la subida del nivel freático, descrita en detalle en el apartado 4.2.3.1, y que se compara con la evolución del drenaje en la figura 6.4. La descarga del acuífero, más lenta que el agua superficial, mantiene el efecto del riego sobre el nivel del freático y sobre el caudal de los drenajes durante algunas semanas.

Las cuencas del norte y la C1, en el sur, no tienen prácticamente superficie de terrazas. Por tanto carecen del efecto regulador de un acuífero subyacente. C5 y C7 tienen una amplia superficie de secano en suelos sobre Terciario. Como ya se ha informado, son cuencas más impermeables y por tanto tienen mayor respuesta inmediata a las lluvias.

Para evaluar la respuesta de las cuencas a episodios de lluvia que se observaba imparcialmente en los aforos manuales se construyó de la estación automática en la cuenca C4, barranco de Malfarás. Ésta se programó con un periodo de medida de quince minutos. Por motivos económicos sólo se pudo instrumentar una estación, que se escogió por razones logísticas. Además su cuenca, como se indica más adelante, es representativa del conjunto de LASESA. Por último, esta estación permite valorar posibles recursos reutilizables de agua, incluso a nivel de la propia comunidad de regantes.

Los resultados, agrupados en caudales medios diarios, se representan en la figura 6.5. Además del efecto del riego, se comprueba la existencia de importantes picos, de corta duración, derivados de la respuesta a la lluvia. En una primera fase, la existencia de la estación ha permitido comprobar la diferencia entre los aforos realizados con periodicidad quincenal y los de la estación automática para este barranco para el periodo abril-diciembre 2010. Los resultados indican que el volumen determinado con aforo de menor frecuencia sigue la tendencia que marca la estación automática. El volumen total es un 12% menor al de alta frecuencia, debido a los picos de caudal causados por la lluvia.

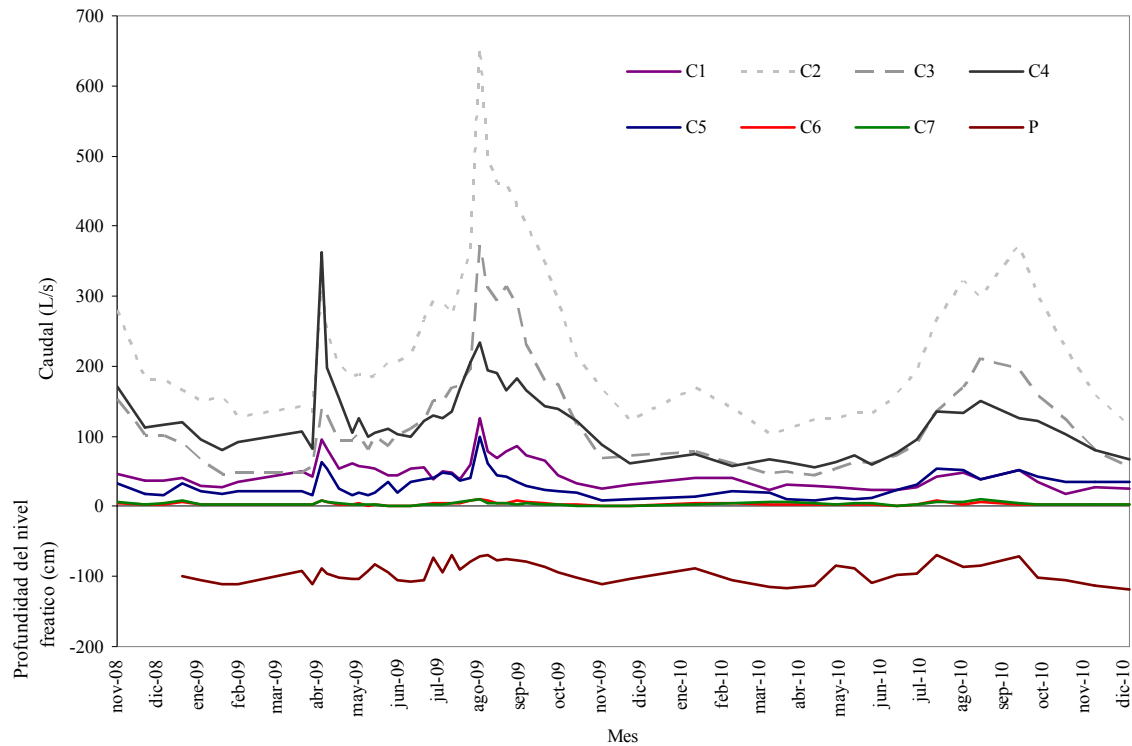


Figura 6.4. Evolución del caudal en los siete barrancos y de la profundidad del nivel freático (P) entre noviembre de 2008 y diciembre de 2010.

A partir de los caudales aforados se determina el agua drenada por cada cuenca que en los meses de verano dobla o triplica al de los meses de invierno (Cuadro 6.3). El volumen medio anual aportado por el conjunto de cuencas fue de 16,3 hm³.

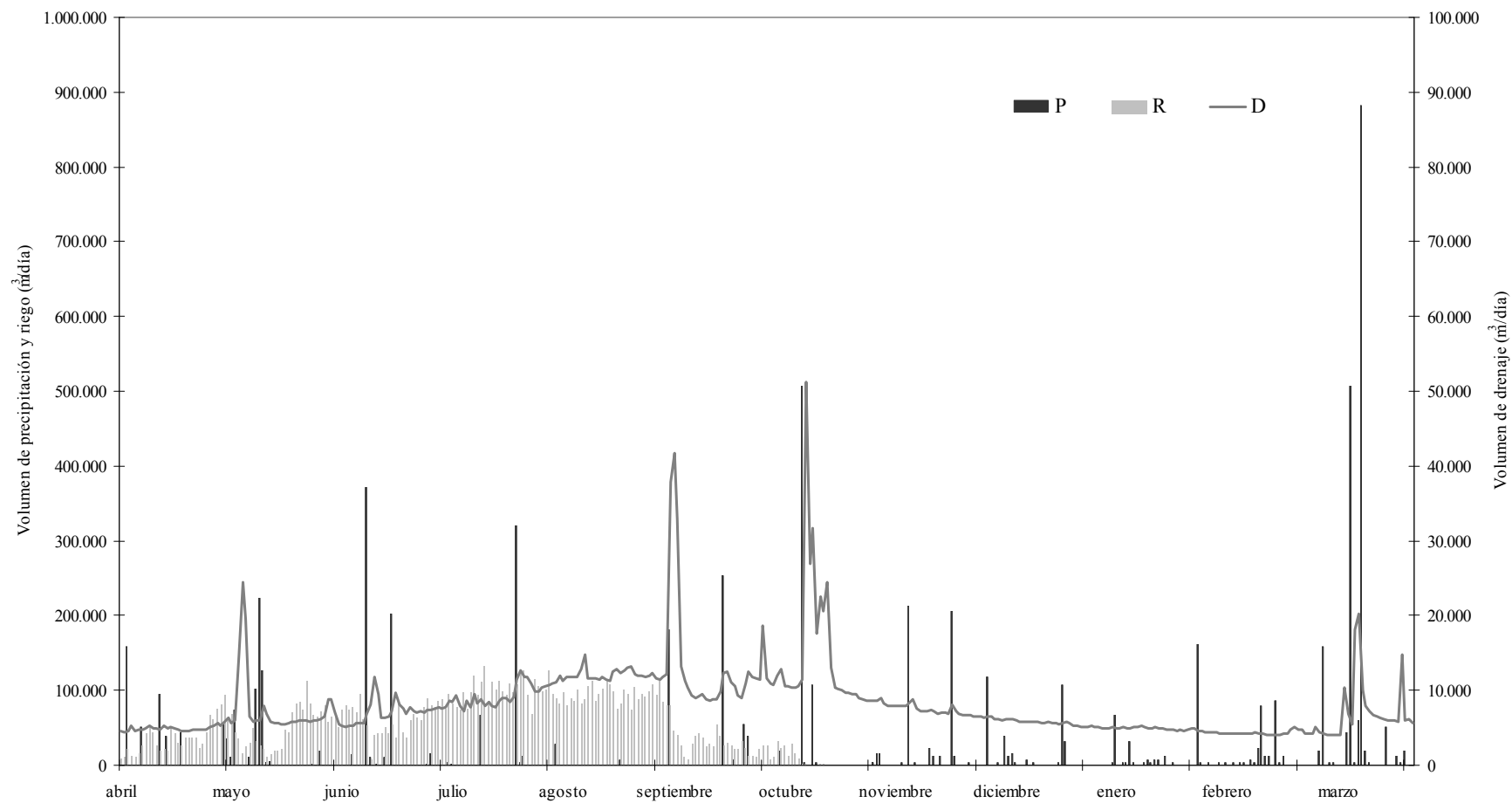


Figura 6. 5. Evolución diaria de los volúmenes de agua drenada por el barranco de Malfarás, C4, (D), lluvia (P) y riego (R), entre abril de 2010 y marzo de 2011.

Cuadro 6.3. Volumen de agua drenado mensual por las siete cuencas de LASESA entre noviembre de 2008 y octubre de 2010.

Mes	Cuenca							Total (hm ³)
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	
nov-08	0,11	0,63	0,35	0,39	0,07	0,01	0,01	1,58
dic-08	0,10	0,47	0,26	0,31	0,06	0,01	0,01	1,23
ene-09	0,08	0,41	0,16	0,25	0,06	0,01	0,01	0,99
feb-09	0,09	0,32	0,12	0,22	0,05	0,01	0,01	0,82
mar-09	0,12	0,37	0,13	0,27	0,06	0,01	0,01	0,97
abr-09	0,17	0,55	0,26	0,47	0,09	0,01	0,01	1,56
may-09	0,15	0,35	0,25	0,30	0,06	0,01	0,01	1,12
jun-09	0,13	0,58	0,28	0,28	0,08	0,00	0,00	1,35
jul-09	0,12	0,79	0,43	0,38	0,11	0,01	0,01	1,86
ago-09	0,22	1,31	0,79	0,53	0,16	0,02	0,02	3,05
sep-09	0,19	1,03	0,62	0,42	0,08	0,02	0,01	2,37
oct-09	0,11	0,68	0,38	0,35	0,05	0,01	0,01	1,58
nov-09	0,07	0,41	0,19	0,21	0,03	0,00	0,00	0,92
dic-09	0,08	0,36	0,20	0,18	0,03	0,01	0,01	0,86
ene-10	0,10	0,43	0,20	0,19	0,04	0,01	0,01	0,99
feb-10	0,09	0,35	0,15	0,15	0,05	0,01	0,01	0,81
mar-10	0,08	0,30	0,13	0,17	0,05	0,01	0,02	0,75
abr-10	0,08	0,31	0,12	0,15	0,02	0,01	0,01	0,70
may-10	0,07	0,35	0,16	0,23	0,03	0,01	0,01	0,86
jun-10	0,06	0,39	0,18	0,21	0,05	0,00	0,01	0,91
jul-10	0,10	0,64	0,32	0,29	0,12	0,01	0,01	1,48
ago-10	0,12	0,83	0,50	0,37	0,12	0,01	0,02	1,98
sep-10	0,12	0,90	0,51	0,41	0,12	0,01	0,01	2,09
oct-10	0,07	0,71	0,38	0,44	0,10	0,01	0,01	1,71
Total	2,64	13,47	7,06	7,18	1,70	0,23	0,25	32,53

6.3.3 Balance hidrológico por cuencas

La evolución mensual de los balances por cuencas se muestra en las figuras 6.6 y 6.7. Estas ponen de manifiesto que durante la campaña de riego, y especialmente en verano, el valor de las entradas y salidas se triplica siendo el riego y la evapotranspiración sus principales componentes. El riego supone una entrada anual de agua media de 439 mm. Su valor mensual lógicamente varía a lo largo de la campaña de riego y alcanzó sus máximos valores en los meses de julio y agosto. El otro componente de entrada de agua en el sistema es la precipitación con un valor medio de 423 mm. En cuanto a las salidas, la más importante fue la ET con un valor anual medio de 674 mm. En las cuencas en las que predomina la superficie de regadío (C1, C2, C3, C4 y C5), el valor medio anual de ET es de 748 mm y desciende a 473 mm en el resto de cuencas (C6 y C7), debido al mayor

porcentaje de superficie de secano. Mensualmente la ET varió entre los 13 mm de diciembre y los 52 mm de julio, condicionados principalmente por la climatología y la distribución y características de los cultivos. El agua aforada anualmente alcanzó un valor medio de 163 mm, valor que constituye el 18% de las salidas totales. El drenaje mensual alcanza sus valores máximos al final de las campañas de riego. El 13% del agua de riego, 57 mm, se perdió por evaporación y arrastre (PEA). El riego influye en el incremento de los volúmenes de salida de agua por evapotranspiración y drenaje. Este efecto se ve atenuado en las cuencas en que el regadío ocupa muy poca superficie como la C5 y C7.

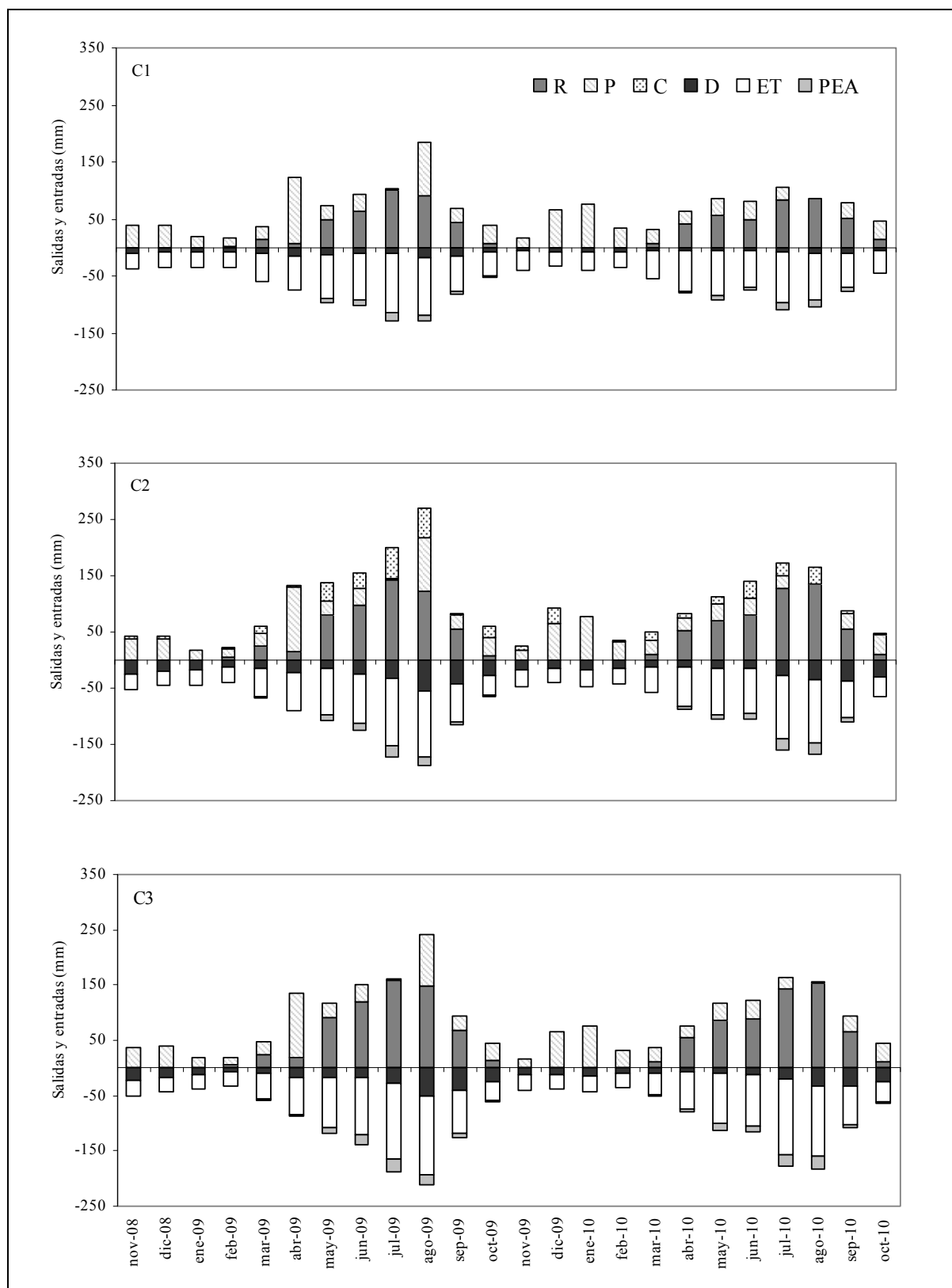


Figura 6.6. Evolución mensual de las entradas (R , P) y salidas (ET , D , PEA) de agua en las cuencas C1, C2 y C3 entre noviembre de 2008 y octubre de 2010.

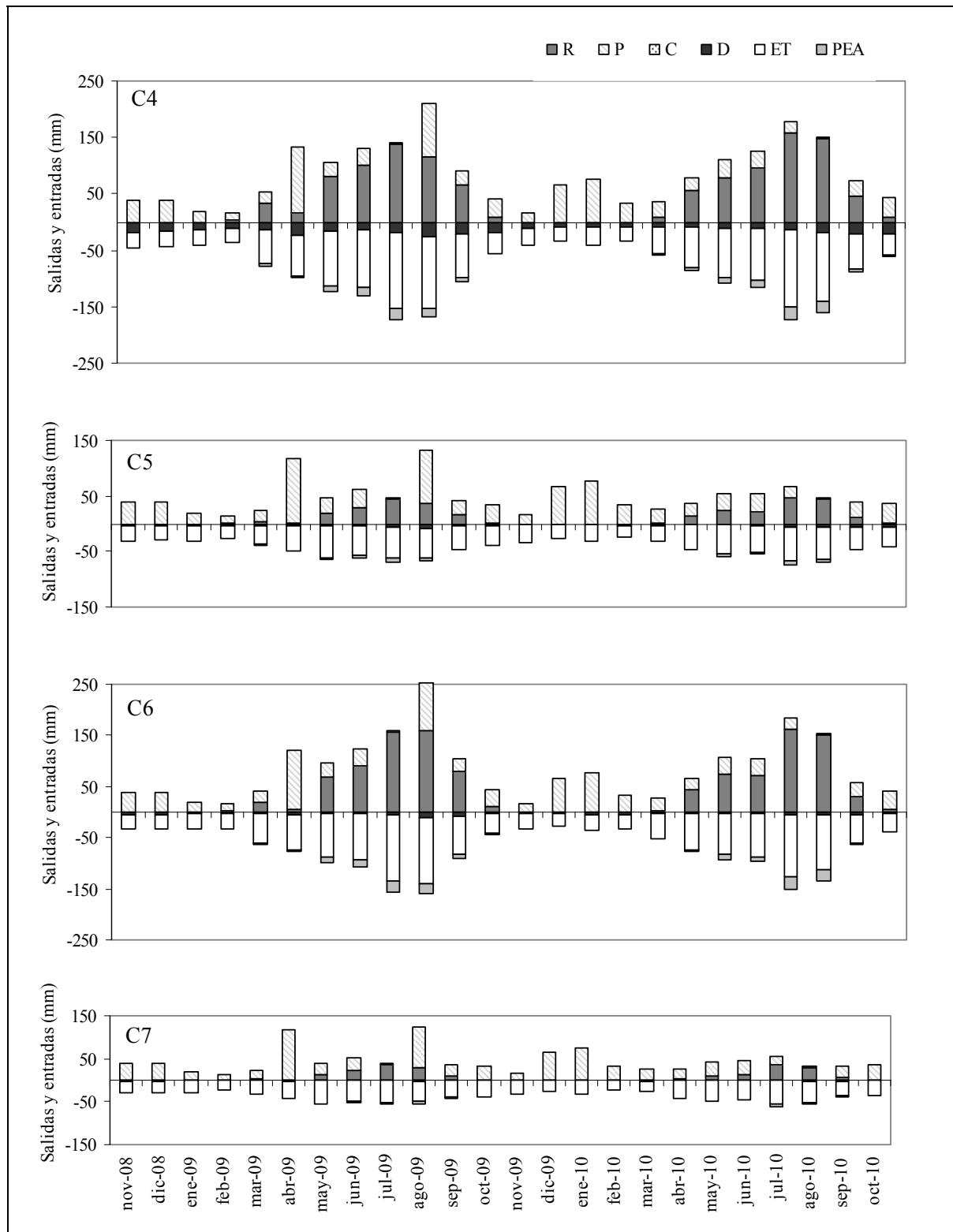


Figura 6.7. Evolución mensual de las entradas (R , P) y salidas (ET , D , PEA) de agua en las cuencas C4, C5, C6 y C7 entre noviembre de 2008 y octubre de 2010.

Para los dos años de estudio, los balances globales se presentan, en forma numérica, en el cuadro 6.4. El riego es la principal entrada de agua en las cuencas, con la excepción de las cuencas C1, C5 y C7, por la mayor superficie de secano. La evapotranspiración

constituye el 75% de la salida de agua del conjunto de las cuencas. Le sigue el drenaje con un 18% y las PEA con un 6%. El drenaje de las cuencas con suelo muy permeable (C2, C3 y C4) triplica al del resto de cuencas con suelo más impermeable (C1, C5, C6 y C7).

El cierre de los balances de agua de cada cuenca es aceptable dado que su error es inferior al 10%, a excepción de la cuenca C6 en la que hay un error del 11%. A nivel de conjunto, el error total es tan solo del 1,3% a favor de las entradas, en lo que parece un claro efecto de compensación. Se observa que las cuencas del norte presentan balances negativos (mayor salida que entrada). Lo contrario sucede en las cuencas del sur, a excepción de la cuenca C2 que recibe directamente agua de desagüe del canal de Pertusa.

Este error podría deberse a errores de medida así como a la existencia de flujos de agua subterránea que exportan agua fuera de la cuenca y que no han sido considerados en este estudio.

El almacenamiento de agua en el suelo (ΔS) tiene una escasa variación neta anual ($0,35 \text{ hm}^3$). La disminución de agua en el acuífero fue de tan solo $0,15 \text{ hm}^3$. En resumen, el volumen de agua almacenada dentro del sistema por cuencas tiene alguna relevancia a escala mensual pero es despreciable a largo plazo, ya que solo representa el 0,1% del agua implicada en el balance.

Cuadro 6.4. Balance de agua de las siete cuencas de LASESA. Entradas (E) [precipitación (P), riego (R), vertido del canal al barranco (C)], Salidas (S) [evapotranspiración (ET), drenaje (D), pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión (PEA)], Almacenamiento (A) [incremento de agua en el suelo (ΔS), incremento de agua en el acuífero (ΔA)] y error del balance entre noviembre de 2008 y octubre de 2010.

		Volumen de agua (hm^3)							Total
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	
E	P	9,99	20,45	12,88	16,68	15,95	1,82	6,64	84,41
	R	8,97	26,21	19,28	22,87	6,07	2,44	1,72	87,57
	C		9,09						9,09
S	ET	15,77	35,16	23,98	31,22	18,22	3,24	7,05	134,63
	PEA	1,16	3,42	2,50	3,00	0,80	0,32	0,23	11,43
	D	2,64	13,47	7,06	7,18	1,70	0,23	0,25	32,53
A	ΔS	0,15	-0,15	-0,19	-0,18	0,34	0,03	0,35	0,35
	ΔA	0,00	-0,06	-0,06	-0,03	-0,01	0,00	0,00	-0,15
ΣE		18,97	55,75	32,16	39,56	22,02	4,26	8,35	181,07
ΣS		19,57	52,05	33,55	41,40	20,72	3,79	7,53	178,59
ΣA		0,14	-0,21	-0,25	-0,21	0,33	0,03	0,35	0,20
E - S - A		-0,75	3,91	-1,14	-1,63	0,96	0,44	0,48	2,27
Error (%)		-4	7	-3	-4	4	11	6	1,3

A modo de comprobación, al igual de lo realizado por Causapé (2009b), Abrahão et al. (2011), Barros et al. (2012) y otros autores, se ha ejecutado un balance del flujo de agua en el acuífero para las diferentes cuencas, que se presenta en el cuadro 6.5. La entrada es el agua que pasa más allá de la zona radicular (D_s) obtenida de la agregación de las diferentes parcelas en cuencas. La excepción es la cuenca C2 donde hay que contabilizar los vertidos del canal (C).

En el cuadro 6.5, vuelve a observarse el mismo sesgo que en el balance global por cuencas. En las del sur, con excepción de C2, la salida del drenaje real es muy superior al que teóricamente drena la zona radicular y lo contrario ocurre en las del norte. Para C2 la explicación podría ser que los aforos quincenales no siempre detectan los vertidos del canal. En C1, C3 y C4 el exceso de agua pudiera deberse a pérdidas del canal y de la red de riego, problemas en la estimación de los diferentes parámetros e incluso a una aportación de agua subterránea. Las pérdidas de la red, en tuberías enterradas, se producen de forma puntual por toda la comunidad. Las fugas más importantes son más fácilmente detectables en terrenos del terciario que bajo las gravas. Hay que destacar, sin embargo, que en la presente comprobación, toda la diferencia entre el agua servida por la CHE y la facturada por LASESA se ha englobado como vertido de canal en C2. Otra posibilidad sería que se hubiera sobreestimado el valor de la CRAD de los suelos de terraza.

La explicación para las cuencas C5, C6 y C7, donde no hay prácticamente suelos sobre terrazas, puede suponer la existencia de un flujo subterráneo al Alcanadre a través del acuífero. En todo caso es interesante el hecho que los resultados parecen condicionados por la existencia o ausencia del acuífero en las gravas.

Cuadro 6.5. Balance de agua en el acuífero de las cuencas de LASESA entre noviembre de 2008 y octubre de 2010. Entrada: drenaje de la zona radicular o suelo (D_s), vertido de aguas sobrantes del canal (C) al barranco de los Arnales, incremento del agua almacenada en el acuífero (ΔA) y Salida: drenaje medido en los barrancos y colectores (D).

	Volumen de agua (hm^3)							Total
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	
D_s	1,90	8,23	5,87	5,52	2,66	0,67	0,73	25,57
C		9,09						9,09
ΔA	0,00	-0,06	-0,06	-0,03	-0,01	0,00	0,00	-0,15
D	2,64	13,47	7,06	7,18	1,70	0,23	0,25	32,53

6.3.4 Índices de uso de agua

Se han calculado, por cuencas, los diversos índices de uso de agua, definidos en 6.2.3. Éstos suponen una distribución del agua entre agua drenada y agua consumida, léase evapotranspirada. A su vez esta se subdivide en uso consuntivo productivo, que es el agua evapotranspirada por los cultivos. El uso consuntivo no productivo corresponde a la evapotranspiración del secano y de las zonas de regadío durante el periodo entre cultivo a las que hay que sumar las pérdidas por evaporación y arrastre. El uso no consuntivo es el agua que se va por los drenajes, que se considera recuperable a nivel de la cuenca del Ebro. Esta distribución, de hecho un modelo contable, se muestra gráficamente en la figura 6.8.

En el conjunto de las siete cuencas se consume una media de 732 mm de agua al año, de los que 464 mm se han evapotranspirado por los cultivos. Además se drenan 163 mm de agua que retornan al río Alcanadre por barrancos y colectores. En porcentaje, la fracción consuntiva (FC) se sitúa en el 81% y la recuperable (FR) en el 18% respecto al agua total de entrada. La fracción consuntiva productiva (FC_P) es del 63% y la consuntiva no productiva (FC_P) es del 37%. El consumo no productivo se reparte entre pérdidas por evaporación y arrastre (8%) y evapotranspiración no productiva (29%).

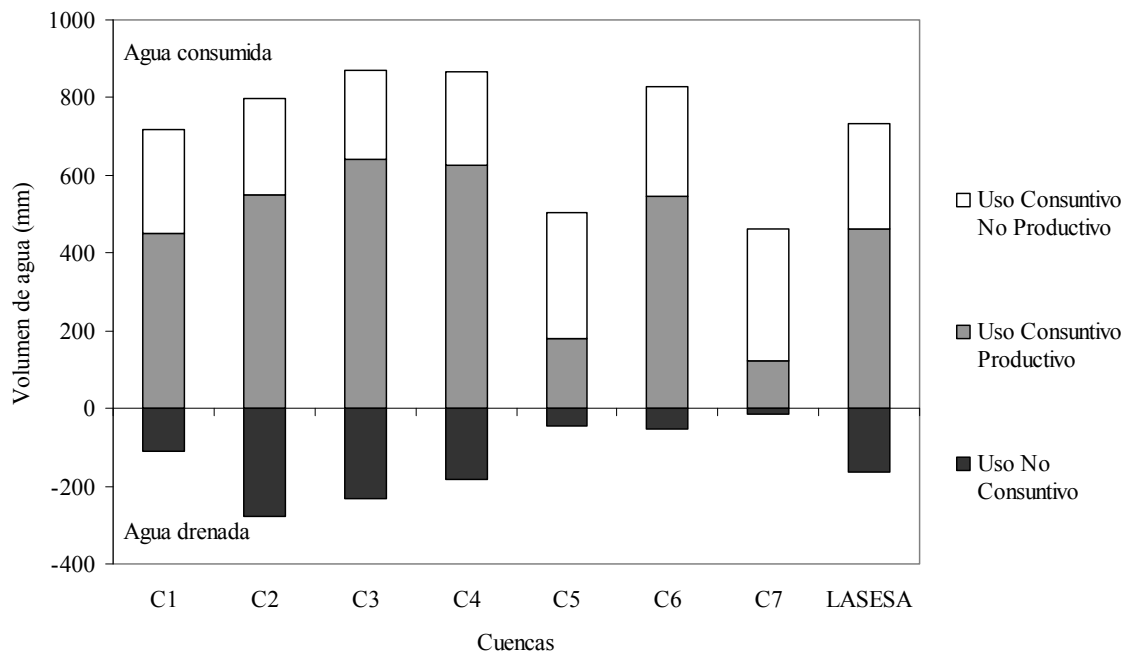


Figura 6.8. Usos del agua en las cuencas que drenan LASESA entre noviembre de 2008 y octubre de 2010.

Las siete cuencas responden de manera diferente a pesar de cultivarse y regarse del mismo modo. Así, el agua consumida por las cuencas en las que predomina el secano, C5 y C7, es aproximadamente la mitad de la que se consume en las que predomina el regadío. En segundo lugar, la evapotranspiración de los cultivos está relacionada directamente con la proporción del regadío de cada cuenca como se observa en la figura 6.9.

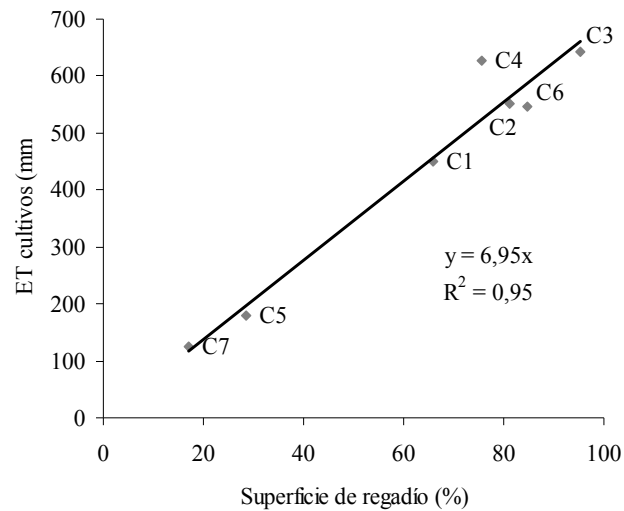


Figura 6.9. Evapotranspiración de los cultivos en función del porcentaje de regadío de cada cuenca.

En tercer lugar, el volumen de agua drenado por cada cuenca es función de la naturaleza de sus suelos. Las cuencas con suelos más permeables (C2, C3 y C4) tienen una fracción recuperable media del 22% y un valor medio de 234 mm. Este valor es superior a los datos cuantificados en otros regadíos por aspersión del valle medio del Ebro por Tedeschi et al. (2001), Caverio et al. (2003), Abrahão et al. (2011a), CHE (2011) y Shkiri y Dechmi (2011). En el resto de cuencas de LASESA, la fracción recuperable media es menor (9%) con un valor medio de 59 mm. En este sentido, la figura 6.10 muestra que existe una relación inversa entre la CRAD del suelo y el volumen medio de agua drenado por cada cuenca (D).

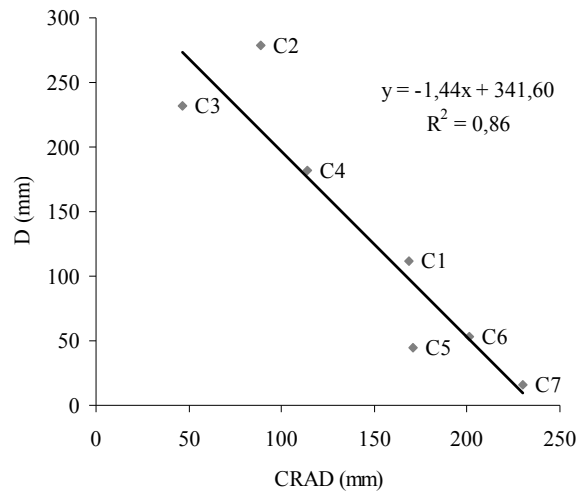


Figura 6.10. Drenaje en función de la capacidad de almacenamiento de agua (CRAD) media de cada cuenca.

6.3.5 Balance agregado por cultivos.

Los apartados anteriores se han centrado en balances hidrológicos, sin considerar los cultivos, cuyo manejo de riego se ha explicitado en el capítulo 5. Para considerar el efecto de aquellos sobre el drenaje en los colectores, se ha efectuado una agregación por parcelas, cultivos y cuencas a partir de la base de datos ya citada. Los resultados, considerando en conjunto a las siete cuencas, para el año medio y agrupados por cultivos, se presentan en el cuadro 6.6. Esta información sirve de base para los balances de sales y nitrógeno del capítulo siguiente. Además se desglosa la información entre regadío y secano. En el último se incluyen las zonas no cultivadas situadas dentro del regadío. En forma global, la entrada de riego más precipitación, para el conjunto de las cuencas, es de 862 mm. La precipitación total aporta un valor medio anual de 423 mm. En la zona de regadío, $R + P$ es igual a 1221 mm, valor muy similar al valor estimado de la ET_0 , 1216 mm año⁻¹ por el método de Penman-Monteith. La ET es la salida de agua más importante, 674 mm para el total de las cuencas. La superficie regada contribuye con 940 mm a la evapotranspiración, pero sólo 713 mm corresponden a la evapotranspiración directa de los cultivos, o productiva, y el resto se debe al periodo sin cultivo.

El balance de agua en el suelo estima que el 15% de las entradas abandona la zona radicular y se convierte en drenaje. Este drenaje estimado supera los 200 mm para los dobles cultivos. Para el conjunto de las cuencas se estima un valor de D_s equivalente a 128 mm, este valor es muy próximo los 117 mm, resultantes de restarle la aportación directa del canal (C) al drenaje real (D).

Cuadro 6.6. Balance de agua en suelo por cultivos (recuadro blanco) y balance de agua del conjunto de las cuencas (recuadro gris). Entradas (E) [precipitación (P), riego (R), vertido del canal al barranco (C)], Salidas (S) [(evapotranspiración (ET), drenaje del suelo (Ds), drenaje aforado (D), pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión (PEA)], Almacenamiento (A) [incremento de agua en el suelo (ΔS), incremento de agua en el acuífero (ΔA)] y error del balance anual medio entre noviembre de 2008 y octubre de 2010.

Balance hidrológico de las cuencas (mm)												
Balance de agua del suelo (mm)												Cuencas
		Maíz	Cebada y maíz	Alfalfa	Cebada	Otras forrajeras	Guisante y maíz	Otros cultivos	Regadío	Secano	Cuencas	
E	P	423	423	423	423	423	423	423	423	423	423	423
	R	812	891	932	282	735	967	554	799	0	439	439
	C											46
S	ET	943	984	1059	549	897	1038	868	940	351	674	674
	PEA	110	116	120	33	92	125	71	104	0	57	57
	Ds	187	211	192	96	172	242	65	181	64	128	163
	D											
A	ΔS	-5	-1	-11	17	-3	5	-27	-4	8	2	2
	ΔA											-1
												907
ΣE												907
ΣS												895
ΣA												1
E - S - A												11
Error (%)												1,3

6.4 Conclusiones

Se estima que el 15% de las entradas de agua abandona la zona radicular y se convierte en drenaje. Su valor unitario anual es 128 mm para el conjunto de las cuencas y 181 mm para el regadío. En dobles cultivos supera los 200 mm.

El volumen de riego y la permeabilidad del suelo regulan el caudal de agua drenado por las cuencas de LASESA, que se dividen en dos grupos. En el primero dominan suelos sobre terrazas con baja capacidad de retención de agua. El agua sobrante de riego recarga el acuífero y aumenta el caudal de drenaje durante la campaña de riego. El caudal medio se sitúa entre los 100 y 200 L s⁻¹. Aunque baja al finalizar la temporada de riego, es relativamente constante durante el resto del año. En el segundo grupo los suelos tienen una mayor capacidad de retención de agua y se sitúan directamente sobre el Terciario. El caudal medio es muy bajo (41-4 L s⁻¹) y varía intensamente con los episodios de lluvia.

LASESA devuelve a la atmósfera el 81% de la entrada total de agua. Sólo el 63% es evapotranspiración de los cultivos. El 18% del agua entrante sale de la cuenca como agua de drenaje. La superficie regada es responsable del 61% de este drenaje.

La baja capacidad de retención de agua en el suelo de las principales cuencas de LASESA es un factor determinante para que su fracción media recuperable, el 22%, sea la mayor de los regadíos por aspersión del valle del Ebro. En el resto de cuencas con suelos de mayor capacidad de retención de agua la fracción recuperable es del 9%.

7 Balance de sales y nitrógeno

7.1 Introducción

El riego es una importante fuente de contaminación difusa dado que sus retornos lavan y transportan los compuestos más solubles del suelo, como diversas sales naturales, e ión nitrato, que se incorporan a los acuíferos y ríos receptores (Ongley, 1996; Tanji y Kielen, 2002; Zalidis et al., 2002; Aragüés y Tanji, 2003; Ribbe et al, 2008; Stamatis et al., 2011; Robertson y Sharp, 2012).

En el valle del Ebro las principales afecciones del regadío sobre la calidad de las aguas subterráneas y superficiales son las causadas por las sales y el nitrato (Quilez et al., 1992; Causapé et al., 2006; Isidoro y Aragüés, 2007). Para abordar estos problemas se han llevado a cabo balances de sales (Alberto et al., 1986) y nitrógeno (Orús y Sin, 2006) a gran escala en la zona. Esta herramienta sirve para analizar la situación y evitar la degradación del sistema agrario y del conjunto de los ecosistemas. También se han realizado un gran número de balances de sales y nitrógeno, a escala menor por Faci et al. (1985), Isidoro (1999), Tedeschi et al. (2001), Causapé (2002), Cavero et al. (2003), Causapé et al. (2004b), Isidoro et al. (2006a y b), Causapé (2009b), Abrahão (2010), Abrahão et al. (2011), Barros (2011), CHE (2011) y Barros et al. (2012a y b). Estos estudios concluyen que la masa de contaminantes exportada depende del volumen de percolación y de la cantidad de sales y nitrógeno disponible para el lavado. Para reducir esta exportación proponen un aumento de la eficiencia del riego. En base a la mayor eficiencia del riego por aspersión, cabría esperar una disminución en la masa de contaminantes exportados en los retornos de riego tras la modernización (Lecina et al., 2008, 2009, 2010a). Sin embargo, sería necesario que también se produjera una mejora en la gestión de agua y fertilizantes.

Para estudiar estos aspectos en LASESA, en el presente capítulo, se confeccionan los balances de sales y nitrógeno durante las campañas 2009 y 2010 y se cuantifican las masas de sales y nitrógeno en sus principales flujos. El análisis permite evaluar la eficiencia del abonado nitrogenado así como el impacto sobre el agua de drenaje de una zona regada por aspersión según la forma de gestión actual. Los datos se han comparado con los obtenidos por Cuchí (2001) y Ballester (2003) en los mismos puntos de muestreo.

7.2 Metodología

La metodología se divide en tres partes. En la primera se presentan los métodos analíticos y en la segunda y tercera se definen los balances de sales y nitrógeno respectivamente.

7.2.1 Análisis de agua

La calidad de agua de riego se obtiene de la red de calidad de Control del Estado de las Masas de Agua Superficiales (CEMAS), en la estación del embalse de El Grado (CHE, 2010). El agua de lluvia, se ha analizado en muestras tomadas del pluviómetro de la EPS de Huesca.

El agua de drenaje y la subterránea se han muestreado con frecuencia quincenal en los siete colectores principales de la LASESA, aunque en el primer año se reforzó a semanal durante la campaña de riego, en la línea de lo recomendado por Isidoro et al. (2010). Las muestras se guardaron en nevera refrigerada y se transportaron en el día a los laboratorios de la EPS. La temperatura del agua y la conductividad eléctrica (CE), se midieron “in situ” mediante sonda de conductividad modelo 315i de WTW.

La concentración de ión nitrato $[\text{NO}_3^-]$ se analizó mediante acidulado en un espectrofotómetro Unicam 5625 UV/VIS Spectrometer con lámpara de deuterio, a 220 y 275 nm. Los iones sodio, calcio y magnesio se analizaron por espectroscopía de Absorción Atómica. A partir de su concentración iónica se determinó la relación de adsorción de sodio (SAR). Se hizo un análisis clúster mediante el programa estadístico PAST 2.17c (Hammer et al., 2001).

Para un conjunto de muestras se realizó un análisis de los iones más importantes por cromatografía iónica, en un equipo Metrohm 850 IC del Laboratorio Municipal de Salud Pública del Ayuntamiento de Zaragoza. La alcalinidad se hizo por volumetría con indicador. Con estos resultados se determinó el grado de saturación de los distintos minerales en el agua analizada mediante el programa WATEQ del U.S. Geological Survey.

7.2.2 Balance de sales

En el balance de sales de las cuencas se ha calculado la masa de sales en cada componente del balance hídrico definido en el capítulo 6. La masa de sales de cada término se obtiene como el producto entre el volumen de agua y su concentración de sales. Ésta se estima como el producto de la CE del agua en dS m^{-1} por el factor de conversión de 640 mg L^{-1} (Bower y Wilcox, 1965). No se considera la evapotranspiración ni las pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión por carecer de iones. También se supone que la exportación de sales por las cosechas es insignificante. Así pues, el balance de sales tiene los siguientes componentes: entrada de sales por riego (S_R) y precipitación (S_P), salida por drenaje (S_D) y el almacenamiento de sal en el acuífero (ΔS_A). El incremento de sales en el sistema formado por las cuencas (ΔS) es la diferencia entre las entradas S_R y S_P menos la salida S_D y el almacenamiento ΔS_A . Si ΔS es positivo, se interpreta que hay procesos de acumulación de sales. Si es negativo se asume que hay un lavado de sales en la cuenca.

7.2.3 Balance de nitrógeno

El balance de nitrógeno (N) es una herramienta esencial para evaluar el manejo de la fertilización nitrogenada y cuantificar la contaminación difusa en los retornos del regadío. Mediante encuestas a una muestra representativa de agricultores se determinó la fertilización, tipos de fertilizantes, fechas de aplicación y rendimiento de los cultivos. Las pérdidas de nitrógeno a la atmósfera por volatilización y por desnitrificación no se han tenido en cuenta, por carecer de datos sobre los que basar una estimación fiable de las mismas. Las entradas consideradas son la masa de nitrógeno en el agua de riego (N_R), en la precipitación (N_P) y en el vertido del agua sobrante del canal al barranco de los Arnales (N_C). Además se ha considerado el nitrógeno aplicado como fertilizante mineral (N_{FM}), el nitrógeno aplicado como fertilizante orgánico (N_{FO}), y la fijación simbiótica por las leguminosas (N_{FS}). Las salidas consideradas han sido la masa de nitrógeno en el agua de drenaje (N_D), y la extracción por los cultivos (N_E). La diferencia entre entradas, salidas y el incremento de nitrógeno en el acuífero (ΔN_A) es la variación del almacenamiento de nitrógeno en el sistema (ΔN). El N_{FM} se obtuvo multiplicando las dosis de abonado resultado de las encuestas por la riqueza en nitrógeno del abono utilizado. La alfalfa puede cubrir sus necesidades de nitrógeno gracias a la fijación simbiótica. Sin embargo, si se le

aporta abono nitrogenado la planta toma con preferencia el aportado, deja de producir nódulos y de fijar nitrógeno atmosférico a través de las bacterias. Si se realiza un abonado parcial, la fijación simbiótica se encarga de cubrir el resto de las necesidades de la alfalfa. Además cuando se alza un alfalfar, la cantidad de N que queda en el suelo en las coronas y raíces dejadas en el campo, supone al menos 150 kg N ha^{-1} . La liberalización de nitrógeno de coronas, raíces y restos de cosecha es lenta y se produce a lo largo de los tres o cuatro años siguientes al enterrado (Delgado y Muñoz, 2005). Para cuantificar este aporte de N por mineralización equivalente a $37,5 \text{ kg N}$ por hectárea se multiplica por la superficie de alfalfa levantada.

El nitrógeno aportado por la fertilización orgánica (N_{FO}) se ha calculado a partir del censo ganadero de la comunidad de regantes: 26.270 cerdos, 5.701 ovejas y 570 terneros. El valor neto de N que llega al suelo por tipo de animal y año se ha estimado en de $8,7 \text{ kg}$ por cerdo, $18,9 \text{ kg}$ por oveja y 77 kg por ternero (Orús, 2003). Se supone que el purín y estiércol se aplica de forma homogénea en toda LASESA, con un valor medio de 35 kg N/ha . La masa de N que entra en el agua de lluvia (N_P) y de riego (N_R) se determinó como el producto del volumen por la concentración de nitrato de cada uno. La extracción de nitrógeno por parte de los cultivos (N_E) se obtuvo a partir del producto de su rendimiento por el contenido de N en el producto cosechado. El contenido de N por 1000 kg de materia seca cosechada se estimó en 24 kg para la cebada, $17,3 \text{ kg}$ para el grano de maíz (14% de humedad), 29 kg para la alfalfa, 22 kg para el resto de los forrajes y $12,5 \text{ kg}$ de guisantes (Betrán, 2006). No se consideran las extracciones de N contenida en los restos de cosecha del maíz porque lo usual en la zona es incorporar los residuos de cosecha al suelo. La masa de nitrógeno nítrico exportado a través de los barrancos y colectores (N_D), se calculó como el producto del volumen de agua aforado por su concentración. Se asume que la mayor parte del N presente en el agua se encuentra en forma de nitrato. El almacenamiento de N en el acuífero (ΔN_A) se calculó con la oscilación del nivel del agua subterránea, la superficie del acuífero, la porosidad y la concentración de nitrato de las muestras de agua subterránea. Finalmente el incremento de N en las cuencas se calcula como las entradas ($N_{FM}+N_{FO}+N_{FS}+N_P+N_R$) menos las salidas (N_E+N_D) y el almacenamiento en el acuífero (ΔN_A).

7.3 Resultados y discusión

7.3.1 Calidad química del agua

El agua de riego procede del embalse de El Grado y tiene un valor de CE relativamente constante de $0,3 \text{ dS m}^{-1}$. Estos valores se constatan con mediciones puntuales en el Canal de Pertusa. El valor medio de la CE en el agua de lluvia de Huesca fue de $0,034 \text{ dS m}^{-1}$. Los valores de CE máximos, medios, mínimos y coeficiente de variación (CV) para cada punto de muestreo se muestran en el cuadro 7.1. La CE media fue de $1,7 \text{ dS m}^{-1}$, oscilando entre un mínimo de $0,8 \text{ dS m}^{-1}$ de P en marzo de 2010 y $4,1 \text{ dS m}^{-1}$ de C1 en febrero de 2009.

El CV de la CE del agua de drenaje y subterránea fue del 36%. El 95% de las muestras se encuentran entre $0,7$ y 3 dS m^{-1} . Por tanto, su salinidad es moderada para su posible reutilización como agua de riego. Además, la combinación CE-SAR indica que se pueden utilizar para el riego sin problemas de infiltración del suelo (Ayers y Westcot, 1994).

Cuadro 7.1. Conductividad eléctrica (CE) medida en el agua de drenaje, pozo y balsa.

Punto de muestreo	Cajal C1	Arnales C2	Colector C3	Malfarás C4	Miranda C5	Picardón C6	Las Vacas C7	Pozo P	Balsa B
CE (dS/m)									
Media	2,7	1,4	1,1	1,5	1,5	2,2	2,1	1,1	1,5
Máximo	4,1	1,7	1,5	1,9	2,2	3,1	2,9	1,3	1,7
Mínimo	1,8	1,1	1,0	1,0	1,0	1,0	1,2	0,8	1,3
CV (%)	25	12	8	13	23	20	22	12	6
nº muestras	50	52	52	52	52	52	50	50	48

La evolución de la CE en el agua de drenaje y del agua subterránea se representa en la figura 7.1. En el agua de drenaje se aprecia que la conductividad alcanza sus máximos en invierno y disminuye en verano por un efecto de dilución durante la campaña de riego, paralelo al aumento de caudal. Este efecto es mucho más pronunciado en las cuencas menos permeables (C1, C6 y C7) que en las instaladas sobre gravas. Las aguas de pozo y balsa tienen una menor variabilidad temporal.

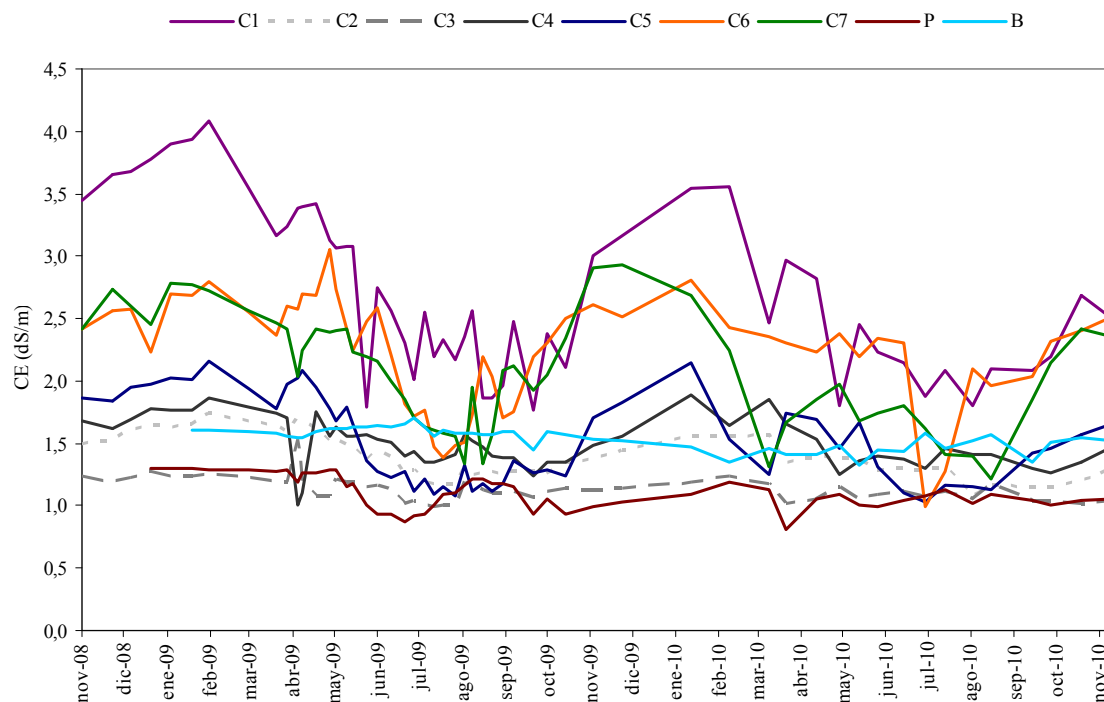


Figura 7.1. Evolución temporal de la conductividad eléctrica (CE) en aguas de drenaje y subterránea en LASESA, entre noviembre de 2008 y noviembre de 2010.

La evolución temporal de la CE de los nueve puntos muestreados se agrupa en dos conjuntos según el análisis clúster, tal y como muestra la figura 7.2. El primero lo forman las cuencas C1, C6 y C7, que se caracterizan por tener las CE más altas y sobre todo por su gran diferencia entre la época de riego y el resto del año. El segundo grupo se subdivide, a su vez, en otros dos. Uno está formado por las cuencas C2, C4, C5 y el pozo, donde también disminuyen los valores durante la época de riego pero no tanto como en el primer grupo. Además, los valores de CE también son menores que en el primer grupo. Por último, el segundo subgrupo está formado por la cuenca C3 y la balsa. En este, los valores son muy constantes debido al efecto homogeneizador que produce el acuífero.

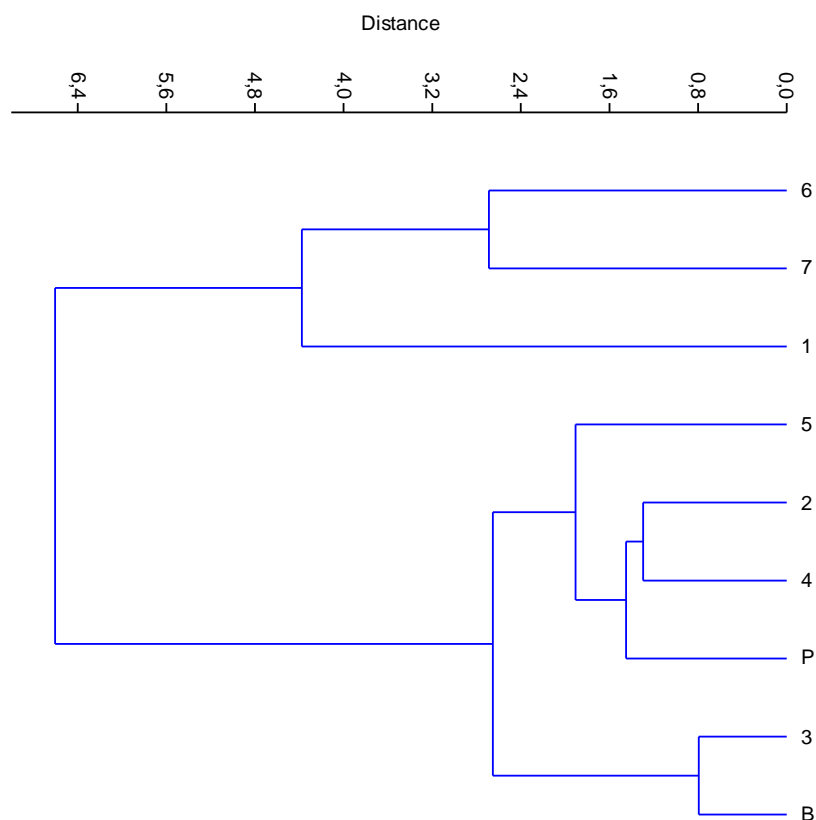


Figura 7.2. *Análisis clúster de la evolución temporal de la CE en aguas subterráneas y de drenaje en LASESA.*

Los resultados de la analítica de las diversas aguas se resumen en el cuadro 7.2, donde también se presenta la información disponible procedente de Cuchí (2001), Ballester (2003) y CHE (2010).

Como es lógico, el agua de riego tiene características propias del agua del Cinca como una conductividad moderada, del orden de $0,3 \text{ dS m}^{-1}$ y un claro predominio de iones bicarbonato y calcio. Ballester (2003) indica que el 93 % de las sales que se importan con el agua de riego corresponden a carbonatos de calcio y magnesio y sulfato de calcio. Para el presente trabajo se ha realizado la misma operación obteniendo resultados similares. En LASESA, el riego con estas aguas, supondría, como mucho, la acumulación de estas sales, sin problemas de salinización secundaria o sodificación en el complejo de cambio. Estos resultados son compatibles con los datos analíticos de los perfiles de suelos estudiados en el capítulo 4.

Cuadro 7.2. Caracterización química del agua de riego, subterránea y de drenaje (media \pm desviación estándar) en LASESA, en 2003, 2009 y 2010: conductividad eléctrica (CE), principales iones y relación de adsorción de sodio (SAR).

Muestras	CE 25°C dS/m	Calcio mg/L	Magnesio mg/L	Sodio mg/L	Potasio mg/L	Alcalinidad mg/L	Cloruro mg/L	Nitrato mg/L	Sulfato mg/L	SAR (meq/L) ^{-0.5}
Agua de riego en el embalse de El Grado										
2009-2010 ^a	0,30 \pm 0,06	43,6 \pm 5,5	6,8 \pm 1,0	3,8 \pm 1,0	1,2 \pm 0,4	122,1 \pm 16,6	7,8 \pm 6,6	1,5 \pm 1,4	26,0 \pm 5,9	0,1 \pm 0,0
Agua subterránea										
2009-2010 ^b	1,11 \pm 0,13	243,6 \pm 49,0	20,9 \pm 3,5	50,4 \pm 8,9	0,8	299,0	49,1	193,3 \pm 49,6	131,1	0,8 \pm 0,1
Agua drenada por las cuencas										
2003^c										
1	1,26 \pm 0,29	85,3 \pm 12,5	26,3 \pm 8,5	145,7 \pm 60,3	4,3 \pm 5,1	160,0 \pm 23,9	149,7 \pm 56,4	36,0 \pm 10,5	216,3 \pm 77,4	3,5 \pm 1,1
2	1,62 \pm 0,18	140,7 \pm 9,0	44,7 \pm 3,1	130,7 \pm 11,0	3,9 \pm 4,5	242,7 \pm 3,1	153,7 \pm 23,8	143,8 \pm 24,6	203,7 \pm 28,3	2,5 \pm 0,2
3	1,33 \pm 0,09	142,7 \pm 15,5	34,0 \pm 1,0	74,3 \pm 9,3	1,7 \pm 0,3	233,7 \pm 5,5	102,3 \pm 28,3	155,2 \pm 29,3	139,3 \pm 4,0	1,5 \pm 0,2
4	1,48 \pm 0,42	123,3 \pm 20,8	42,7 \pm 15,5	135,7 \pm 63,7	4,8 \pm 6,1	212,0 \pm 23,1	152,7 \pm 72,6	124,9 \pm 45,3	223,3 \pm 87,4	2,6 \pm 1,0
5	1,66 \pm 0,48	102,0 \pm 8,0	51,0 \pm 15,7	194,0 \pm 84,0	4,2 \pm 1,7	270,0 \pm 31,6	214,0 \pm 80,3	85,0 \pm 32,1	220,0 \pm 55,7	3,9 \pm 1,5
6	1,75 \pm 0,50	70,0 \pm 14,1	63,0 \pm 32,5	251,0 \pm 171,1	3,4 \pm 2,2	218,5 \pm 87,0	266,5 \pm 170,4	96,2 \pm 40,9	242,5 \pm 137,9	5,0 \pm 2,6
7	1,82 \pm 0,83	112,0 \pm 27,1	68,0 \pm 32,2	263,3 \pm 151,8	4,9 \pm 1,5	288,0 \pm 71,5	350,0 \pm 208,9	107,6 \pm 59,0	234,7 \pm 107,1	4,7 \pm 2,2
total	1,55 \pm 0,49	112,9 \pm 28,3	46,3 \pm 20,5	166,7 \pm 98,3	3,9 \pm 3,3	232,8 \pm 52,9	195,0 \pm 120,2	107,4 \pm 52,5	209,9 \pm 71,5	3,3 \pm 1,7
2009-2010^b										
1	2,66 \pm 0,67	328,5 \pm 82,5	79,7 \pm 20,9	360,1 \pm 118,0	1,1	254,0	239,2	89,0 \pm 22,5	463,5	4,7 \pm 1,5
2	1,39 \pm 0,17	299,1 \pm 68,9	44,1 \pm 8,6	119,2 \pm 29,6	0,8	234,0	80,0	121,9 \pm 11,2	170,7	1,7 \pm 0,3
3	1,13 \pm 0,09	172,4 \pm 46,1	30,9 \pm 4,8	73,8 \pm 15,1	1,2	230,0	50,2	131,8 \pm 9,7	133,5	1,4 \pm 0,3
4	1,50 \pm 0,19	171,6 \pm 42,2	50,4 \pm 8,8	157,7 \pm 40,7	1,0	268,0	84,5	107,2 \pm 17,7	215,8	2,7 \pm 0,6
5	1,50 \pm 0,34	169,2 \pm 68,3	51,9 \pm 14,9	185,5 \pm 61,8	1,6	278,0	109,8	78,3 \pm 21,9	138,5	3,2 \pm 0,9
6	2,22 \pm 0,44	153,1 \pm 37,3	73,7 \pm 14,3	273,2 \pm 76,9	3,2	302,0	200,7	92,6 \pm 20,7	208,9	4,5 \pm 1,2
7	2,08 \pm 0,46	137,9 \pm 25,7	71,8 \pm 20,3	254,8 \pm 69,3	2,2	328,0	173,9	98,8 \pm 24,7	151,1	4,4 \pm 1,0
total	1,78 \pm 0,63	204,3 \pm 89,7	57,3 \pm 21,8	202,3 \pm 112,3	1,6 \pm 0,8	270,6 \pm 35,6	134,0 \pm 70,8	102,9 \pm 25,8	211,7 \pm 115,7	3,2 \pm 1,6

^a Datos de CHE n=21^b En cada punto de muestreo n=51 para: CE, Calcio, Magnesio, Sodio, nitrato, SAR y n=1 para: Potasio, Alcalinidad, Cloruro, Sulfato en el periodo 2009-2010^c Datos de Cuchí (2001) en cada punto de muestreo n=17 para: CE, nitrato y n=3 para: Calcio, Magnesio, Sodio, Potasio, Alcalinidad, Cloruro, Sulfato y SAR

A nivel temporal, no se observan diferencias significativas entre los valores de CE del agua drenada del 2003 y del 2009-2010 a excepción de C1, donde este parámetro ha aumentado, sin que se haya podido encontrar una razón plausible, aunque podría deberse a una reutilización parcial de agua por parte de una finca frutera, que se instaló entre ambos periodos de muestreo.

Por cuencas, existen diferencias evidentes en la composición química del agua de drenaje, ya detectadas por Cuchí (2001). Las aguas de las cuencas con mayor superficie en el Terciario, C1, C5, C6 y C7, muestran mayor riqueza en sodio y cloruro. Las aguas de drenaje de las cuencas con mayor superficie de terrazas (C2, C3, y C4), como las aguas subterráneas, presentan una mayor alcalinidad y contenido en calcio.

De hecho, se ha observado la presencia de importantes depósitos de travertino, “tobas”, en el colector C3, asociado a una zona de saltos de agua y crecimiento de carrizos. Diversas observaciones sugieren que se trata de un proceso muy activo, como muestra la comparativa de imágenes de la figura 7.3 en un dren secundario de C2, junto al puente carretera de la A-1310. Informaciones de la comunidad de regantes indican que este tapón, debe de ser eliminado manualmente cada año. El mecanismo de formación es similar al que se produce en manantiales de zonas calizas, por una reprecipitación de carbonato cálcico en el punto de afloramiento del agua subterránea debido al aumento de temperatura y desgasificación de CO_2 , con ayuda de musgos y vegetales.



Abril 2009



Marzo 2010

Figura 7.3. Ejemplo de formación de travertino “toba” en un drenaje secundario de la cuenca C2.

La presencia de las elevadas concentraciones de calcio y alcalinidad indica que se está produciendo un lavado de carbonato cálcico del perfil de suelo y de la grava de

subsuelo y acuífero. La causa pudiera estar en la agresividad del agua de riego, en el efecto de incremento de CO₂ por la actividad biológica del suelo así como en el creciente uso masivo de fertilización ácida, ofertada por la cooperativa Los Monegros.

Para analizar la naturaleza de los depósitos, se realizó un análisis químico detallado de un conjunto de muestras de agua de drenaje de LASESA. Los resultados se analizaron con el programa WATEQ y sus resultados se resumen en el cuadro 7.3. En este se observa que todas las aguas de drenaje, pozo y balsa están saturadas en calcita, aragonito y dolomita ya que su índice de saturación (IS) es mayor que cero. Este hecho es totalmente compatible con la presencia ya descrita de “tobas” en los colectores. C1, C6 y C7 están sobresaturadas en magnesita, carbonato de magnesio, indicando una posible presencia de este mineral o dolomita en el Terciario. Sorprendentemente, C1 está saturada también en anhidrita y yeso, denotando la posible presencia de este mineral que, sin embargo, no se ha observado a simple vista.

Cuadro 7.3. *Índices de saturación (IS) de minerales en agua de drenaje y subterránea en LASESA.*

MINERALES	PUNTO DE MUESTREO								
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	P	B
ANHIDRITA	0,56	-1,61	-1,66	-1,52	-1,79	-1,64	-1,77	-1,52	-1,56
ARAGONITO	2,58	0,32	0,27	0,47	0,48	0,50	0,64	0,08	0,15
ARTINITA	-2,31	-5,14	-5,31	-4,86	-4,82	-4,80	-4,42	-6,10	-5,77
BRUCITA	-3,82	-4,34	-4,57	-4,19	-4,10	-4,01	-3,79	-5,44	-4,69
CALCITA	2,73	0,47	0,42	0,62	0,63	0,65	0,80	0,23	0,30
DOLOMITA	5,12	0,68	0,47	0,98	1,04	1,17	1,45	-0,10	0,53
FLUORITA	1,80	-1,25	-1,53	-1,07	-1,41	-1,51	-1,83	-1,22	-1,04
YESO	0,89	-1,27	-1,33	-1,16	-1,42	-1,28	-1,40	-1,23	-1,27
HALITA	-3,15	-6,79	-7,15	-6,63	-6,49	-6,03	-6,15	-7,25	-6,45
HUNTITA	6,06	-2,74	-3,26	-2,15	-1,99	-1,62	-1,07	-4,59	-2,83
HIDROMAGNESITA	-2,23	-11,44	-12,31	-10,68	-10,38	-9,82	-9,07	-14,74	-11,74
MAGNESITA	2,06	-0,13	-0,29	0,03	0,08	0,20	0,33	-0,68	-0,12
MIRABILITA	-1,53	-6,50	-6,94	-6,09	-6,16	-5,60	-5,87	-7,32	-6,38
NAHCOLITA	-1,21	-4,59	-4,76	-4,39	-4,34	-4,10	-4,13	-4,76	-4,31
NATRONITA	-3,41	-8,47	-8,90	-8,02	-7,83	-7,38	-7,38	-9,56	-8,51
NESQUEONITA	-0,99	-3,15	-3,31	-2,99	-2,94	-2,82	-2,69	-3,71	-3,14
TENARDITA	-2,94	-7,96	-8,37	-7,60	-7,72	-7,15	-7,40	-8,57	-7,61
TERMONATRITA	-5,30	-10,41	-10,81	-10,00	-9,86	-9,41	-9,39	-11,30	-10,22
TRONA	-6,68	-15,13	-15,67	-14,59	-14,44	-13,75	-13,73	-15,99	-14,44

Índices negativos indican subsaturación. Índices positivos, en negrita, sobresaturación.

Por su interés, los resultados de nitrato se hacen de forma específica. La concentración media de nitrato en las 23 muestras de agua de lluvia es de 5,7 mg L⁻¹ con un rango entre 16,6 y 0,8 mg L⁻¹. Estos valores son altos pero similares a los presentados por Camarero y Catalán (1993) y Sanz et al. (2002). El agua de riego, tal y como aparece

en el cuadro 7.2, tiene un valor medio de $1,5 \text{ mg L}^{-1}$ ($\pm 1,4$), habitual en muchos análisis de aguas no contaminadas de ríos pirenaicos.

En las aguas de drenaje y subterráneas, el 90% de las muestras tienen $[\text{NO}_3^-]$ en el rango 30 y 160 mg L^{-1} . El CV fue del 35%, similar a la presentada por la CE. Cabe destacar que los datos superiores corresponden al agua subterránea muestreada en el pozo. Se supone que su contenido en nitrógeno aún no ha sido afectado por las freatofitas. Los valores de $[\text{NO}_3^-]$ máximos, medios, mínimos y CV para cada punto de muestreo se exponen en el cuadro 7.4. El valor medio de $[\text{NO}_3^-]$ fue 115 mg L^{-1} , con un mínimo de 35 mg L^{-1} , en junio de 2010, en C5. El máximo fue 267 mg L^{-1} en el pozo en julio de 2009, relacionable con el abonado de maíz. La concentración de nitrato del agua subterránea (P) es menor a la detectada en otros acuíferos poco profundos situados en zonas de agricultura intensiva (Causapé et al., 2006; Stamatis et al., 2011). Por su parte las aguas de drenaje tienen los valores altos que caracterizan a las zonas de cultivo exclusivo de maíz (David et al., 1997; Jaynes et al., 2001).

Los niveles altos de nitrato están relacionados con el lavado de los fertilizantes nitrogenados tal y como sucede en zonas de regadío (Ongley, 1996; Causapé et al., 2006; Isidoro y Aragüés, 2007; Ribbe et al., 2008; Stamatis et al., 2011). El agua del acuífero muestra una mayor concentración que el agua de los drenajes. Podría explicarse por extracción debida a freatofitas a lo largo de los cauces abiertos de los colectores.

Cuadro 7.4. Concentración de nitrato $[\text{NO}_3^-]$ del agua de drenaje y subterránea de LASESA.

	$[\text{NO}_3^-] \text{ (mg L}^{-1}\text{)}$								
	Cajal	Arnales	Colector	Malfarás	Miranda	Picardón	Las Vacas	Pozo	Balsa
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	P	B
Media	89	122	132	107	79	93	100	194	122
Máximo	131	140	145	137	126	150	143	267	153
Mínimo	41	101	106	48	35	39	45	103	95
CV (%)	25	9	7	17	27	21	24	26	11
nº muestras	50	52	52	52	52	53	51	50	48

La evolución temporal de la concentración de nitrato en el agua subterránea y en los siete drenajes principales se muestra en la figura 7.4. En las cuencas C2, C3, C4, y en la balsa, los valores de concentración de nitrato se mantienen muy constantes, lo que se atribuye a un posible efecto regulador del acuífero existente en estas cuencas. La sorprendente excepción es el agua del pozo, que por un lado presenta los valores más altos,

una fuerte oscilación temporal y un descenso neto muy acusado en el conjunto del periodo estudiado. Se supone que los ascensos son debidos a episodios de abonado intenso y los descensos puntuales a riegos intensos no fertirrigados. En las cuencas C1, C5, C6 y C7, se aprecia que la concentración de nitrato varía a lo largo de la campaña. Los valores son menores durante la campaña de riego, por la dilución debida al riego, de modo similar a lo observado para la CE en la figura 7.1.

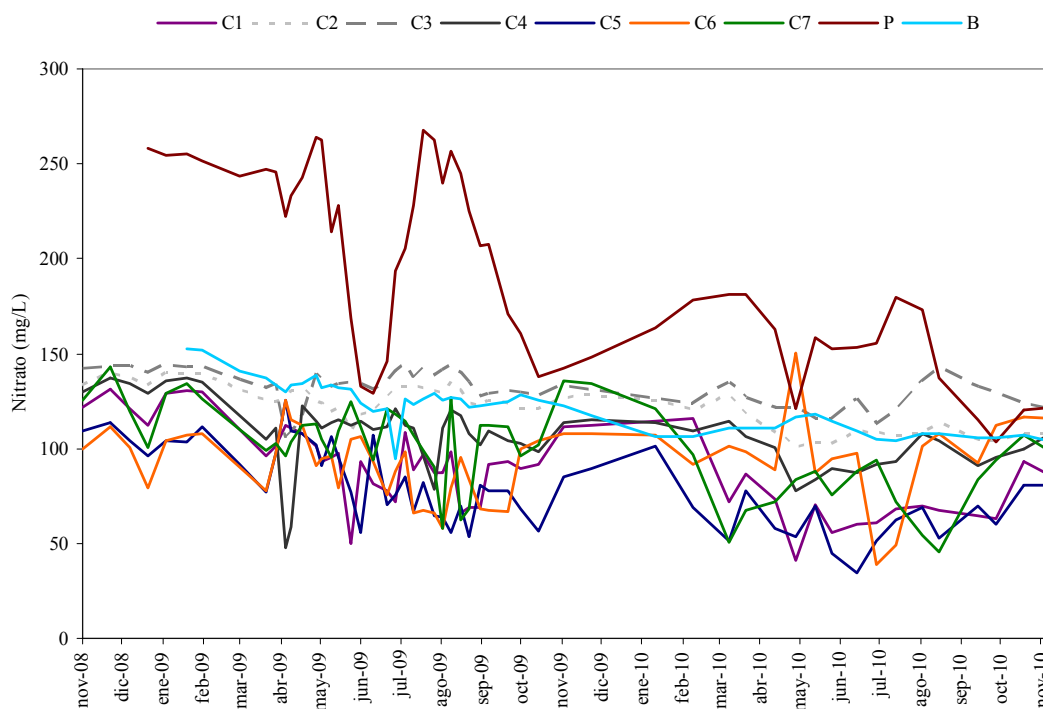


Figura 7.4. Evolución de la concentración de nitrato en LASESA entre noviembre de 2008 y noviembre de 2010.

Un análisis clúster, sobre la evolución de la concentración del nitrato, permite distinguir tres grupos (figura 7.5). El dendrograma muestra con claridad la independencia del agua del pozo sobre los restantes puntos de agua. Estos últimos se subdividen en cuencas C1, C5, C6 y C7, por un lado, y las restantes por otro, corroborando lo ya comentado en el párrafo anterior.

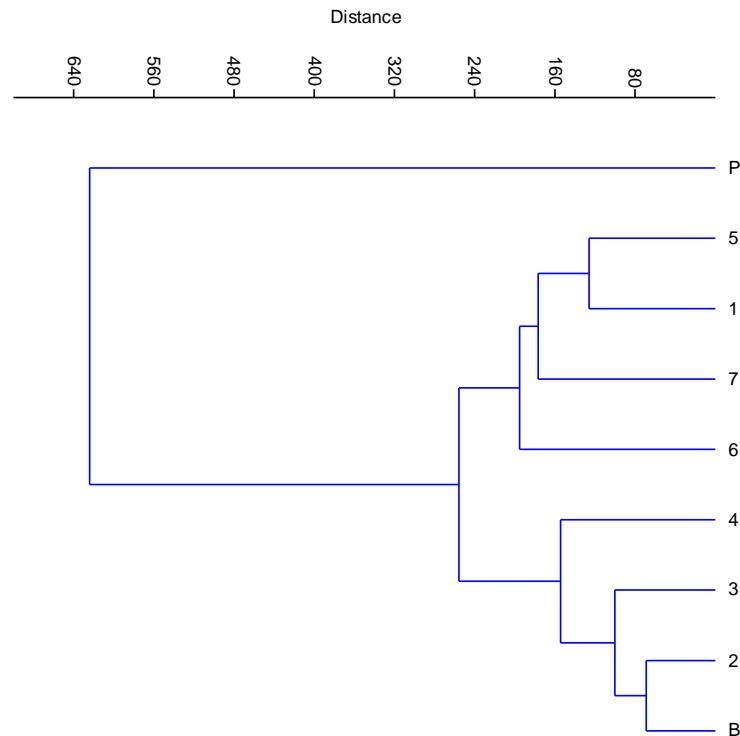


Figura 7.5. *Análisis clúster de la evolución temporal de la concentración de nitrato en LASESA en 2008-2010.*

En el agua subterránea y en los siete drenajes se observa una tendencia negativa en la concentración de nitrato, que podría estar relacionada con la disminución de la fertilización mineral de nitrógeno, a causa del incremento de sus precios y el descenso de la rentabilidad del maíz. Esta tendencia se refuerza comparando con los datos de Cuchí (2001), Ballester (2003), Ballester et al. (2010) y Andrés y Cuchí (2010). El caso más espectacular, ya comentado es el pozo, donde la concentración media bajó de los 219 a los 150 mg L⁻¹ entre la campaña del 2009 y la del 2010. En el agua de los drenajes la disminución de la concentración de nitrato fue mucho menor, pasando de 108 a 95 mg L⁻¹.

7.3.2 Balance de sales

Una vez realizado el balance hidrológico de las cuencas (capítulo 6), es posible proceder con el balance de sales. Las masas de sales se calculan a partir de la CE de algunos términos del balance de agua. Este balance se ha realizado por cuencas y agrupado, los resultados se muestran en el cuadro 7.5.

Para el conjunto de LAESA, el agua de riego supone el 82% de las entradas de sal, una media de 1189 kg ha⁻¹. La lluvia aporta 92 kg ha⁻¹. El agua sobrante del canal supone 81 kg ha⁻¹. La acumulación de sales en el suelo es la incógnita del balance. La acumulación de sales en el acuífero es insignificante, 3 kg ha⁻¹, dada la mínima variación en el volumen de agua y en su conductividad. Dado que la evaporación y la evapotranspiración no exportan sales, la única salida es el drenaje y su valor medio anual es de 1538 kg ha⁻¹. Restando las aportadas en las entradas, y el almacenamiento, se obtiene una exportación neta de 594 kg ha⁻¹ que puede asociarse a procesos de disolución de sales, predominantemente carbonato cálcico, sobre los de precipitación.

Aplicando la metodología de Causapé (2009c) y otros autores, se supone que en el lavado intervienen todas las sales aportadas por riego y lluvia. Esto supone que un 39% de las sales exportadas por el drenaje procedió de la disolución de los materiales edáficos y geológicos. Otro 50% tuvo su origen en las sales introducidas con el agua de riego y tan solo el 6% se correspondieron a las sales contenidas en el agua de lluvia. El restante 5% de las sales proviene del vertido de agua sobrante del canal al barranco de los Arnales (C2). El valor de sales exportadas por el conjunto de LASESA es inferior a los registrados en otros regadíos del valle del Ebro por Faci et al. (1985), Tedeschi et al. (2001), Causapé et al. (2004b), Isidoro et al. (2006a), Causapé (2009c), Abrahão et al. (2011b) y Barros et al. (2012a). Esta diferencia está relacionada con la naturaleza no salina del suelo de LASESA.

Sin embargo, el análisis de los balances por cuencas pone de manifiesto una realidad ligeramente más compleja, observándose que hay procesos de lavado de sales de las cuencas C1 a C5 y de acumulación de sales en las cuencas C6 y C7 (Cuadro 7.5).

Cuadro 7.5. Balance de sales medio anual en las cuencas que drenan LASESA. Entradas (*E*) [precipitación (*S_P*), riego (*S_R*), vertido del canal (*S_C*)], Salida (*S*) en el drenaje aforado (*S_D*), Almacenamiento (*A*) en [acuífero (ΔS_A) suelo (ΔS)] entre noviembre de 2008 y octubre de 2010.

		Masa de sales (kg ha ⁻¹)							Total
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	
E	S_P	92	92	92	92	92	92	92	92
	S_R	667	958	1119	1029	279	982	187	774
	S_C		333						81
S	S_D	1975	2435	1673	1748	427	750	205	1538
A	ΔS_A	0	4	7	2	0	0	0	3
E - S - A = ΔS		-1216	-1056	-469	-629	-56	324	73	-594

La comparación entre la masa anual de sales exportadas y el volumen de agua drenada por cada cuenca, se presenta en la figura 7.6, donde se diferencian dos grupos. Por un lado, están las cuencas C1, C6, C7 y, por otro, C2, C3, C4, y C5. En los dos grupos la relación, evidentemente es directa, aumentando la masa exportada de sales conforme aumenta el volumen de agua de drenaje. En el primer grupo de cuencas, la relación entre el volumen de drenaje y sales exportadas es del doble que en el segundo. Asumiendo que el manejo del riego es similar en todas las cuencas, la masa de sales exportadas por unidad de superficie está influida por la mayor CE del agua de drenaje. Esta se deriva de la mayor salinidad de parte de los suelos, como la detectada en C1 (perfil Val Cajal).

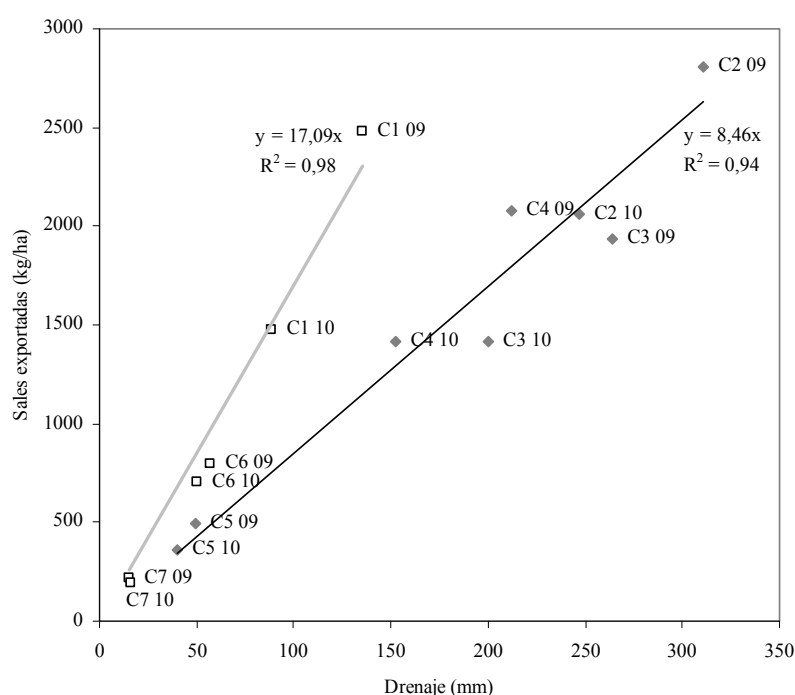


Figura 7.6. Masa de sales exportada por volumen de drenaje y cuenca en LASESA en 2009 y 2010.

7.3.3 Balance de nitrógeno

El balance de nitrógeno (N) se ha realizado basándose también en el balance hídrico de las cuencas efectuado en el capítulo 6. Es más complejo que el balance de sales debido a que las principales entradas y salidas, como la fertilización y la cosecha, dependen en gran medida del manejo de cada agricultor.

Este comportamiento se ha determinado mediante el análisis de 40 encuestas realizadas a regantes y empresas de servicios agrarios que cultivan y gestionan el 19% del

área estudiada. De las encuestas, se ha deducido que al maíz, como cultivo único, se suele aplicar 60-70 kg N ha⁻¹ como abonado de presembrado en torno a la primera quincena de abril. Los agricultores que tienen cerdos, aplican purín entre enero y marzo. Normalmente se siembra durante la segunda quincena de abril. En la primera cobertura se aplica una media de 150 kg N ha⁻¹ durante la segunda quincena de mayo, cuando la planta tiene 8 hojas. En el 60% de los casos se aplica en forma de abono líquido (N32, N25 y N35) y en el 40% restante en forma de abono sólido (urea). Con los riegos de junio se aplica una segunda cobertura de abono líquido y en algunos casos se aplica una tercera, incluso cuarta cobertura en julio, antes del penacho. La suma de todas las aplicaciones se sitúa en torno a 280 kg N ha⁻¹, valor similar al que se aplicaba hace una o dos décadas en otras áreas de riego por aspersión estudiadas por Sexton et al. (1996) y Caverio et al. (2003), pero un 15-20% superior a los valores actuales (CHE, 2011). Se cosecha a finales de octubre o principios de noviembre, con un rendimiento medio de 12.500 kg ha⁻¹ al 14% de humedad. Es habitual la realización de un secado artificial excepto cuando se deja secar en la planta hasta enero o febrero. En los meses de noviembre y diciembre se pica el rastrojo de maíz.

La siembra de la cebada se hace normalmente en noviembre o diciembre pero antes se aplica el abonado de “fondo” o presembrado (30-40 kg N ha⁻¹). En marzo se aplica el abonado de cobertura (70-80 kg N ha⁻¹). El abonado nitrogenado tiene un valor medio total de 112 kg N ha⁻¹. Este dato es inferior al aplicado en el riego por aspersión de Monegros II, según lo determinado por Caverio et al. (2003) y CHE (2011), pero similar al de riego por superficie de la cuenca de la Violada, estudiada por Isidoro et al. (2006b) y Barros et al. (2012b). La cosecha se realiza a primeros de junio con rendimientos en torno a los 7.000 kg ha⁻¹, al 12% de humedad. En dos terceras partes del rastrojo se sembró maíz a continuación. La paja de cebada se puede empacar dependiendo de si su volumen dificulta la siembra directa del maíz, del precio de la paja y de la costumbre del agricultor. Lo más habitual es empacar la paja y después hacer la siembra directa del maíz.

En el maíz después de cebada se siembra y abona en junio. Este abonado de fondo supone unos 40-60 kg N ha⁻¹. La primera cobertura se aplica cuando la planta tiene 5 hojas. La segunda antes del penacho. Cada una se sitúa en torno a los 115 kg N ha⁻¹ y se aplican con abono líquido diluido en los riegos. Se cosecha en noviembre, con unos rendimientos en torno a los 11.000 kg ha⁻¹.

La alfalfa se siembra habitualmente en otoño aunque algunos agricultores esperan a la primavera. Con anterioridad se aplica un abonado de “fondo” o presiembra. Cuando la alfalfa ya está implantada, del 2º año en adelante, recibe dos o tres abonados de cobertera en abril, junio y agosto con dosis bajas de N. El abonado medio es de 141 kg N ha^{-1} , este valor es muy superior al de otras zonas de regadío del valle del Ebro estudiadas por Cavero et al. (2003), Isidoro et al. (2006b), CHE (2011), Barros et al. (2012b). Normalmente la alfalfa se mantiene en el campo unos cinco años y recibe cinco o seis cortes al año, el primero a mitad de abril y el último en octubre, con un intervalo entre cortes de 35 días. La producción media anual de materia seca fue de $14.260 \text{ kg ha}^{-1}$. Prácticamente toda la producción se destina a deshidratado en plantas locales.

En el guisante para congelado se aplica un abonado de presiembra en torno a la primera quincena de enero. La fecha de siembra es normalmente a mediados de enero. Algún agricultor también aplica el purín en febrero. Se cosecha con máquinas propiedad de las empresas conserveras en la 2ª quincena de mayo, con unos rendimientos medios de 7.000 kg ha^{-1} . En todos los casos se siembra maíz a continuación.

En el caso de maíz sembrado después de guisante para industria, las fechas de cultivo se retrasan respecto al maíz como cultivo único. El guisante se cosecha en la segunda quincena de mayo y en el plazo de una semana se siembra el maíz. Con los riegos de junio se aplica una primera cobertera de abono líquido y una segunda en julio o agosto. Aunque las fechas son diferentes los valores son muy similares a los del maíz después de cebada. Se cosecha en noviembre, con unos rendimientos en torno a los 13.000 kg/ha .

Después de la alfalfa el principal cultivo forrajero fue el ray grass. Lo normal es dar dos cortes en invierno y primavera que suponen unos 8.000 kg ha^{-1} de forraje verde. Si se deja para semilla, se cosechan unos 1.500 kg ha^{-1} y luego se recoge 2.000 kg ha^{-1} de paja húmeda. Si no se deja para semilla se le da un tercer corte. En algunos casos se pica en verde y se transporta a plantas deshidratadoras de alfalfa.

Los valores medios de fertilización nitrogenada mineral (N_{FM}), el nitrógeno extraído teóricamente por los cultivos (N_E) y su relación (N_{FM}/N_E) para cada uno de los cultivos considerados se sintetizan en el cuadro 7.6. Los mayores valores de N_{FM} se dan en las denominadas otras forrajeras y el maíz. Como este último ocupa la mayor superficie, se ha procurado determinar su fertilización lo más exactamente posible. No se han constatado diferencias entre el abonado del maíz como cultivo único y maíz como segunda cosecha.

El maíz recibe en todos los casos un abonado de presiembra y una cobertera. La mayoría de los agricultores (82%) aplica una segunda cobertera, una minoría (17%) aplica una tercera cobertera y sólo el 6% aplica una cuarta.

La relación entre la fertilización nitrogenada mineral y la extracción de los cultivos (N_{FM}/N_E) varía entre el 0,3 de la alfalfa y el 1,5 del maíz tras cebada. El bajo valor de la alfalfa se debe a la aplicación de un 30% de sus necesidades nitrógeno. Se asume que el resto se fija simbióticamente. Este índice es también inferior a la unidad para la cebada, donde se estaría aplicando un abonado un 30% inferior a sus necesidades. Por el contrario, en el cultivo de maíz se produce el mayor exceso de fertilización. Un 30% en el cultivo único y tras guisante y hasta un exceso del 50% en el maíz tras cebada. Con un riego moderado, este N que no extrae el maíz ($N_{FM}-N_E$) podría estar disponible para el siguiente cultivo. Sin embargo, como se ha indicado en el capítulo 6, lo habitual es que haya un exceso de riego y, por lo tanto, el nitrógeno se lava y pasa al agua subterránea que aflora a los colectores de drenaje. En este sentido, las parcelas de maíz se pueden identificar como la principal fuente de contaminación por nitrógeno de LASESA, por una combinación de fertilización y riego excesivos.

Cuadro 7.6. Valor medio y desviación estándar de rendimiento de los cultivos, fertilización nitrogenada mineral (N_{FM}), extracción nitrogenada de los cultivos (N_E) y su relación (N_{FM}/N_E) en LASESA en 2009 y 2010. Número de encuestas (n).

Cultivo	Rendimiento (kg/ha)	N_{FM} (kg/ha)	N_E (kg/ha)	N_{FM}/N_E	n
Maíz	12.549 ± 2.074	281 ± 74	217 ± 36	1,3 ± 0,4	14
Cebada	6.957 ± 189	112 ± 5	167 ± 5	0,7 ± 0,0	3
Alfalfa	14.260 ± 559	141 ± 62	414 ± 16	0,3 ± 0,1	5
Maíz tras cebada	11.103 ± 179	281 ± 80	192 ± 3	1,5 ± 0,4	3
Otras forrajeras	15.073 ± 3.129	303 ± 58	332 ± 69	1,0 ± 0,4	3
Guisante	6.947 ± 242	88 ± 9	87 ± 3	1,0 ± 0,1	6
Maíz tras guisante	13.019 ± 1.873	296 ± 96	225 ± 32	1,3 ± 0,3	6

Los principales componentes del balance de nitrógeno medio anual del conjunto de las cuencas se muestran en el cuadro 7.7. El núcleo blanco es el balance de nitrógeno global para el suelo de los diferentes cultivos de regadío así como el suelo no cultivado. En el regadío la lluvia y el riego contribuyen con 5 y 3 kg N ha⁻¹ respectivamente. La fertilización mineral media es 253 kg N ha⁻¹. La orgánica sólo alcanza a 35 kg N ha⁻¹. Para el conjunto de campos en regadío de las cuencas estudiadas, el nitrógeno resultante de la fijación simbiótica de la alfalfa es de 72 kg N ha⁻¹. Este valor, lógicamente asciende

cuando solamente consideramos los campos de alfalfa a 229 kg N ha^{-1} . Como se ha explicado en la metodología, en los campos recién levantados de alfalfa quedan raíces y coronas, cuya mineralización aporta N y que también se ha computado en el balance como fijación simbiótica. La fertilización mineral representa la principal entrada de nitrógeno (67%) al sistema formado por las cuencas. A falta de información sobre la concentración de N en el agua drenada más allá de la zona radicular de cada cultivo, se ha supuesto que todo el exceso de N de la zona radicular es arrastrado por el agua de drenaje. En este caso, a partir del balance teórico, se estima que el suelo de las cuencas drena una media de 41 kg N ha^{-1} . Este valor es muy cercano a los 43 kg N ha^{-1} obtenidos a partir de los datos de aguas de drenaje. Por ello se supone que la hipótesis anterior puede estar cercana a la realidad. Según esta suposición, los 181 mm de agua drenada a través del suelo, en la superficie regada, capítulo 6, tendrían una concentración media de nitrato de 154 mg L^{-1} . Este valor, también es relativamente cercano a los valores medios reales en el agua subterránea (194 mg L^{-1} en el pozo y 122 mg L^{-1} en la balsa).

El nitrógeno extraído por los cultivos del regadío (N_E) supone el 80% de las salidas del conjunto de las cuencas y su valor medio es de 306 kg N por hectárea regada. El nitrógeno exportado por el agua de drenaje es la otra salida, con un valor medio anual de 43 kg N por hectárea de cuenca. Este valor supera al registrado en otras cuencas con riego por aspersión del valle del Ebro por Caverio et al. (2003), Abrahão et al. (2011b), CHE (2011). El valor del nitrógeno exportado se estima que asciende a los 63 kg N por hectárea de regadío y lo hace aún más en el caso del cultivo de maíz. Estos valores están en torno a los valores obtenidos en ensayos de campo con cultivo de maíz en los EE.UU. (Martin et al., 1996; Sexton et al., 1996; Klocke et al., 1999). Según el modelo planteado, los cultivos fertilizados y regados en exceso, como el maíz, serían los responsables de la mayor parte de la exportación de nitrógeno. De esta manera, la clave para reducir la lixiviación de nitratos en este regadío supone adaptar la fertilización nitrogenada y el riego del maíz a sus necesidades tal y como recomiendan otros estudios (Ritter y Manger, 1985; Sexton et al., 1996; Isidoro et al., 2006b; Gheysari et al., 2009; Barros, 2011; Isla et al. 2012).

Cuadro 7.7. Balance de nitrógeno medio anual en suelo (núcleo en blanco) para cada cultivo y para conjunto de cuencas de LASESA (en gris), entre noviembre de 2008 y octubre de 2010. Entradas por [precipitación (N_P), riego (N_R), fertilización mineral (N_{FM}), fertilización orgánica (N_{FO}), fijación simbiótica (N_{FS}), vertido del canal (N_C)], salidas por [extracción de los cultivos (N_E), drenaje estimado de la zona radicular o suelo (N_{DS}), drenaje aforado (N_D)] y almacenamiento en el acuífero (ΔN_A) en kg N ha⁻¹.

	Balance de nitrógeno de todas las cuencas (kg N ha ⁻¹)										Cuencas
	Balance de nitrógeno del suelo (kg N ha ⁻¹)										
	Maíz	Cebada y maíz	Alfalfa	Cebada	Otras forrajeras	Guisante y maíz	Otros cultivos	Regadío	Secano	Cuencas	
N _P	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
N _R	3	3	4	1	3	4	2	3	0	2	2
N _{FM}	276	385	141	111	296	379	259	253	0	139	139
N _{FO}	35	35	35	35	35	35	35	35	9	23	23
N _{FS}	4	4	229	4	4	4	4	72	0	40	40
N _C											0,2
N _E	219	358	414	167	339	313	306	306	0	168	168
N _{DS}	104	75	0	0	4	113	0	63	14	41	
N _D											43
ΔN _A											0,9

El balance de nitrógeno de cada una de las cuencas se presenta en el cuadro 7.8. En todas ellas, la principal entrada es la fertilización mineral y la principal salida es la extracción de los cultivos. Los valores unitarios varían entre cuencas, al depender en gran medida del porcentaje de superficie regada de cada una. No obstante, no existen diferencias entre cuencas a excepción del originado por la proporción de cada cultivo, si estos valores se calculan sólo para la superficie regada.

En el conjunto de las cuencas, las entradas y salidas del balance de nitrógeno son prácticamente iguales. Sin embargo, en el balance individual de cada cuenca no es así.

Se observa que en las cuencas donde dominan los suelos permeables, C2 y C3, las salidas de N son superiores a las entradas. En las restantes cuencas el balance es positivo. Es difícil encontrar una explicación a este hecho. Esta diferencia podría deberse a la diferencia entre entradas y salidas ya reseñada en el balance hídrico de las cuencas. Sin embargo, no hay coincidencia total entre los desbalances de agua y nitrógeno. Pudiera ser, en parte, debido a un lavado de reservas de nitrógeno de abonados de años anteriores presentes en suelos y acuíferos de estas cuencas, proceso que también sugiere la

disminución en la concentración de nitrato observada en el agua subterránea del pozo y que se ha presentado en la Figura 7.4.

Cuadro 7.8. Balance de nitrógeno medio anual para cada cuenca y para su conjunto en LASESA en 2009 y 2010. Entradas por [precipitación (N_P), riego (N_R), fertilización mineral (N_{FM}), fertilización orgánica (N_{FO}), fijación simbiótica (N_{FS}), vertido del canal (N_C)], salidas por [extracción de los cultivos (N_E), drenaje aforado (N_D)] y almacenamiento en el acuífero (ΔN_A) en kg N ha^{-1} .

		Balance de nitrógeno medio anual (kg N ha^{-1})							Total
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	
E	N_P	5	5	5	5	5	5	5	5
	N_R	1	2	2	2	1	2	0	2
	N_{FM}	129	178	203	174	51	161	34	139
	N_{FO}	18	23	27	25	22	24	23	23
	N_{FS}	30	38	62	68	15	27	11	40
	N_C		1						0,2
S	N_E	155	203	246	225	61	180	39	168
	N_D	23	77	70	44	8	11	3	43
ΔN_A	ΔN_A	0,0	1,5	2,4	0,8	0,2	0,0	0,0	0,9
E - S - $\Delta N_A = \Delta N$		5	-34	-19	4	24	28	31	-2

La correlación, por cuencas y año, entre la masa de nitrógeno exportado por los drenajes y el volumen de agua drenada se presenta en la figura 7.7. A diferencia de lo que sucede con la exportación de sales donde la diversa tipología de suelos tenía una clara influencia, en este caso, el nitrógeno depende sólo de la fertilización agronómica. Por esto, la figura mencionada sólo presenta una línea de regresión correlacionando ambos parámetros. Ésta indica que LASESA exporta 27 kg de nitrógeno por cada 1000 m³ de agua drenada. En la figura 7.7 también se observa que las cuencas C2 y C3, sobre suelos con menor CRAD, exportan más agua y nitrógeno que las restantes cuencas.

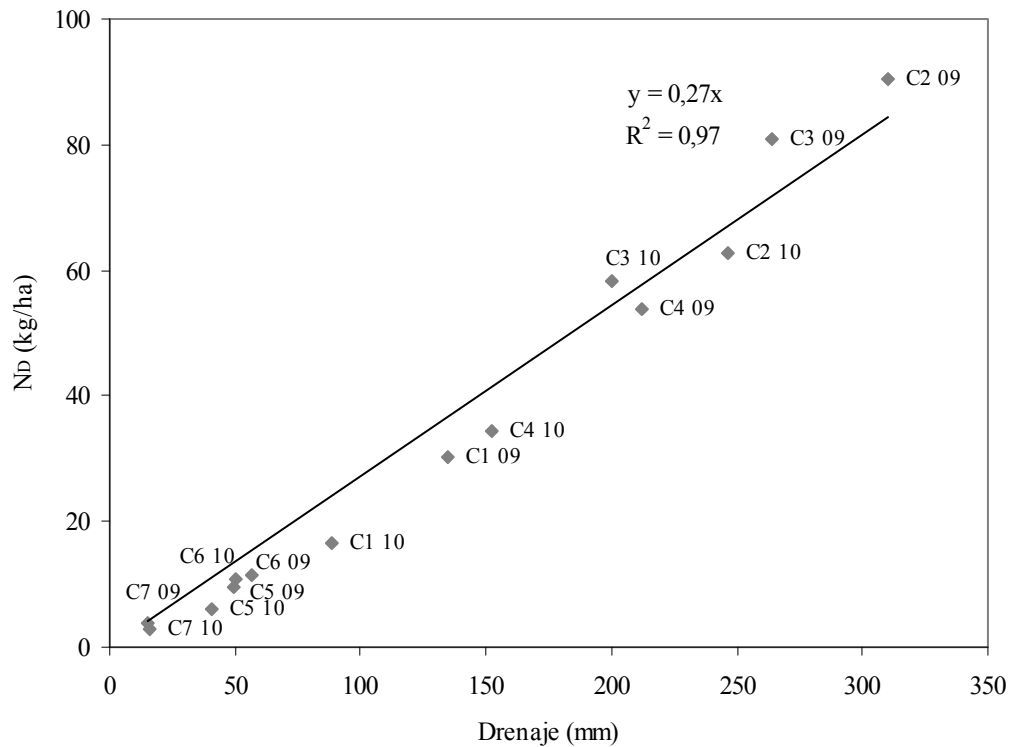


Figura 7.7. Agua y masa de N exportado por cuenca en LASESA durante 2009 y 2010

Abundando en este aspecto, la figura 7.8 muestra la relación entre la masa unitaria de N exportada frente a la fracción de agua recuperable en cada cuenca. En ésta, se observa que el nitrógeno exportado aumenta en forma exponencial al incrementarse el drenaje. La figura sugiere que las cuencas de menor CRAD son menos eficientes en el uso del nitrógeno.

Una forma de disminuir esta lixiviación de nitratos consiste en aumentar la eficiencia del riego para disminuir el volumen de agua drenada o fracción recuperable (Ritter y Manger, 1985; Sexton et al., 1996; Isidoro et al., 2006b; Gheysari et al., 2009; Cavero et al., 2012). Para prever la repercusión que esta práctica podría tener en el caso de LASESA, se simula el cambio en programación de riego expuesto en el capítulo 5. Esta metodología permite estimar una reducción del volumen total drenado por las cuencas de 2,47 hm³ al año. Según la relación de la figura 7.7, esto, disminuiría la masa de nitrógeno lixiviado en un 15%.

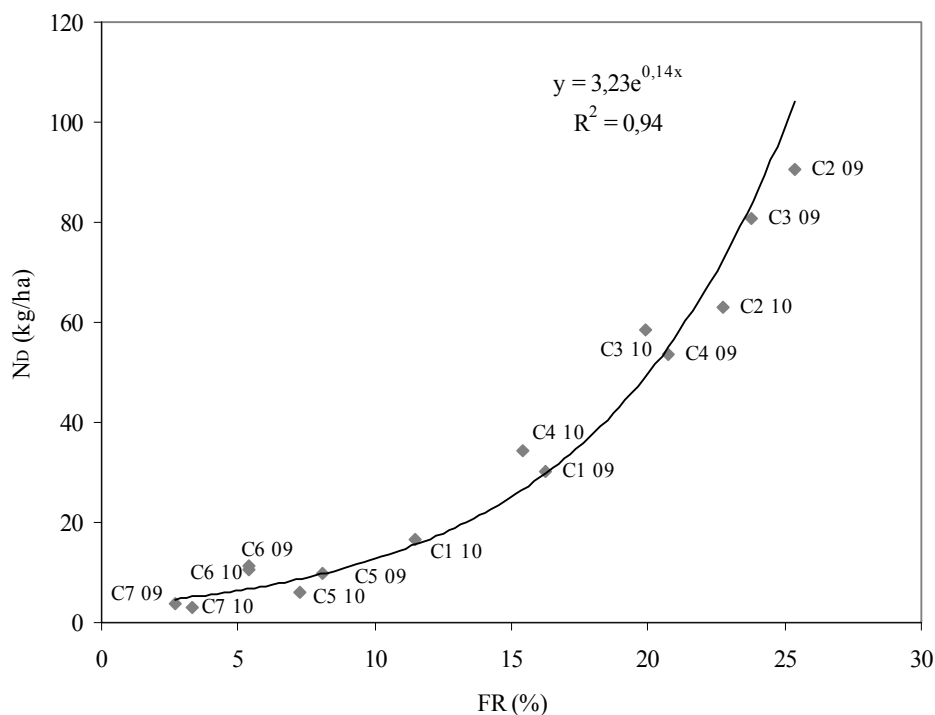


Figura 7.8. Masa de nitrógeno exportado por fracción recuperable en LASESA durante 2009 y 2010.

7.4 Conclusiones

Los materiales geológicos y edáficos presentes en cada cuenca determinan la composición química del agua de drenaje. Las cuencas con predominancia de Terciario drenan agua con sodio y cloruro y las situadas sobre terrazas drenan agua alcalina con calcio. Esto indica que se está produciendo un lavado de carbonato cálcico del perfil de suelo y de la grava de subsuelo y acuífero.

La evolución de la calidad de las aguas de drenaje depende de la permeabilidad del suelo de las cuencas. En las de suelos poco permeables los retornos de riego incrementan el caudal y diluyen claramente las sales y nitrógeno entre abril y octubre disminuyendo la conductividad eléctrica y la concentración de nitrato. Sin embargo en las cuencas con suelos permeables la presencia de un acuífero regula el caudal y estos valores se mantienen muy constantes.

La conductividad eléctrica media del agua de drenaje fue de $1,7 \text{ dS m}^{-1}$. La masa media de sales exportada por el conjunto de cuencas fue de 1538 kg ha^{-1} , de los cuales sólo 38% es exportación neta. Esta masa se dobla en una cuenca con presencia de suelos salinos.

Este valor es inferior al determinado en otros regadíos por aspersión del valle del Ebro con suelos o subsuelos salinos. Las cuencas con suelos no salinos exportaron 0,85 kg de sales por m³ de agua drenada.

La masa media de nitrógeno exportado anualmente por las cuencas fue de 43 kg ha⁻¹. Todas las cuencas tienen cultivos y abonado similar. Sin embargo, la diferente permeabilidad del suelo genera diferentes fracciones de drenaje y por tanto distintas masas de nitrógeno exportado. Cada 1000 m³ de agua drenada por LASESA exporta 27 kg de N.

Los excesivos riego y fertilización del maíz hacen que este cultivo sea la principal fuente de contaminación por nitrógeno. En los últimos años ha descendido esta fertilización y, en consecuencia, las concentraciones de nitratos en el agua de drenaje. Sin embargo, los niveles actuales de nitrógeno en el agua son todavía elevados: 150 mg L⁻¹ en el agua de acuífero y 95 mg L⁻¹ en el agua de drenaje.

Un 26% del nitrógeno aplicado como fertilización mineral y orgánica en LASESA, se pierde por el agua de drenaje, en relación con la eficiencia del actual riego por aspersión. Se estima que un cambio en la programación del riego permitiría reducir la masa de nitrógeno exportado por el drenaje en un 15%.

8 Conclusiones generales

Conclusiones Generales

Durante los años 2008 a 2010, se ha analizado la relación entre la gestión del regadío por aspersión y la contaminación del agua, en la comunidad de regantes de LASESA, donde se considera que se ha alcanzado un equilibrio hidrológico al haber sido transformada hace más de 30 años. A partir del balance de agua, sales y nitrógeno de las principales cuencas drenantes se han caracterizado los factores que intervienen en el ciclo del agua (suelo, subsuelo, cultivos, riego, agua subterránea y de drenaje) y sus interacciones. Especial interés se ha puesto en la determinación de la fertilización nitrogenada, por su influencia sobre la calidad del agua de drenaje.

Por su importancia en la gestión del agua, se han caracterizado los principales suelos presentes en LASESA. A partir de un estudio edafológico se han identificado cuatro subgrupos de suelos: Calcic Petrocalcic, Typic Xerofluvent, Typic Xerorthent y Typic Calcixerept. Atendiendo a sus propiedades hídricas para el riego, se han agrupado en dos unidades.

La primera lo forman los suelos desarrollados sobre terrazas y laderas que representan dos terceras partes de la superficie de LASESA. Tienen una elevada pedregosidad que, en general, aumenta con la profundidad. También se observa un aumento en el porcentaje de arena en los horizontes inferiores. Los niveles más antiguos presentan horizontes B_k bien desarrollados. Su velocidad de infiltración estabilizada es relativamente alta ($0,31 \text{ cm min}^{-1}$). La capacidad de retención de agua disponible está relacionada con la presencia de horizonte petrocálcico a escasa profundidad. En este caso, la CRAD es muy baja ($<64 \text{ mm}$), requiriendo unas dosis de riego bajas y una alta frecuencia. Un 34% de los suelos de LASESA están afectados por esta limitación. La segunda lo forman los suelos desarrollados sobre Terciario y los rellenos de vales. Se caracterizan por texturas más finas y ausencia de piedras. Su velocidad de infiltración estabilizada ($0,04 \text{ cm min}^{-1}$) es casi diez veces menor. Su CRAD es moderada ($128\text{-}190 \text{ mm}$), por lo que las dosis de riego pueden ser mayores y las frecuencias menores.

En la zona de terrazas, existe un modesto acuífero libre, cuyo espesor saturado puede llegar a la decena de metros. El coeficiente de almacenamiento específico es de 10%, y se estima un volumen aproximado de 30 hm^3 de agua almacenada. La conductividad hidráulica es alta. En los horizontes superficiales terrosos es del orden de $0,1 \text{ m día}^{-1}$. En gravas limpias asciende hasta los 900 m día^{-1} .

Los materiales terciarios que forman la base de este acuífero tienen menor conductividad hidráulica por lo que actúan como base del acuífero superior. Sin embargo los niveles de arenisca, por fisuración, también pueden conducir agua. Los materiales de relleno de val tienen un valor de conductividad hidráulica intermedia.

Se ha analizado la evolución del patrón de cultivos. El maíz es el más extendido seguido por la cebada y alfalfa. En el 27% de la superficie de regadío se practica el doble cultivo de cebada o guisantes seguidos de maíz. Los riegos a nivel de parcela son más heterogéneos de lo esperable en una comunidad de regantes donde prácticamente solo hay tres cultivos extensivos. Gran parte de los regantes siguen un patrón fijo, regando siempre en los mismos días de la semana y la mitad de los eventos de riego se aplicaron en días consecutivos.

El volumen de riego aplicado es un 19% superior a las necesidades hídricas netas de los cultivos. Este volumen de riego anual, 846 mm, es superior a la mayoría de las zonas de riego por aspersión del valle del Ebro debido a su mayor porcentaje de maíz (57%), alfalfa (25%) y doble cultivo. Por cultivos, el riego máximo anual se produce, evidentemente, en la doble cosecha de maíz tras guisante o cebada (1075 y 943 mm respectivamente). Para la alfalfa es de 973 mm. 872 mm para maíz como cultivo único. 720 mm para otras forrajeras. El valor mínimo de riego se produce en la cebada (254 mm).

La eficiencia media del riego es del 76%. Se estima que el 12% del riego se pierde por evaporación y arrastre y que los cultivos sufren un déficit hídrico del 13%. Este valor se incrementa a 19% en el caso de suelos con muy baja CRAD. Esto llama la atención ya que estos suelos se riegan, de media, un 12% más que al resto de suelos. En las cuencas estudiadas se devuelve a la atmósfera el 81% de la entrada total de agua. La evapotranspiración de los cultivos sólo supone el 63%. El 18% del agua que entra, incluyendo la lluvia, sale de las cuencas como agua de drenaje. La superficie regada es responsable del 61% de este drenaje.

El nivel freático del acuífero en las terrazas está influenciado por el riego y las lluvias. Se incrementa desde el inicio de la campaña de riego, llega al máximo a final del verano y disminuye cuando cesa el riego, para alcanzar rápidamente niveles similares a los de principio de la campaña.

Los materiales edáficos y geológicos presentes en cada cuenca determinan la evolución del caudal y la química del agua drenada por los colectores. Por ello, cuencas con cultivos y abonados similares, exportan diferentes masas unitarias de sales y nitrógeno.

En las cuencas con suelos desarrollados sobre terrazas, el agua sobrante de riego recarga el acuífero y aumenta el caudal de drenaje durante la campaña de riego. Aunque baja al finalizar la temporada de riego, es relativamente constante durante el resto del año. Esta regulación del caudal, por el acuífero, hace que la conductividad eléctrica y la concentración de nitrato se mantengan constantes. La alcalinidad y contenido en calcio en el agua de drenaje indican que se está produciendo un lavado de carbonato cálcico del perfil de suelo y de la grava de subsuelo y acuífero. El volumen drenado es alto y supone el 22% del agua entrante, el mayor de los conocidos en los regadíos por aspersión del valle del Ebro. La alta fracción de drenaje y elevados valores de concentración de nitrato, 120 mg L^{-1} , hacen que la masa anual de nitrógeno exportado ascienda a 64 kg ha^{-1} .

Las cuencas con suelos desarrollados sobre Terciario y rellenos de vales responden en mayor grado a los episodios de lluvia. De abril a octubre, los retornos de riego incrementan el caudal y disminuyen, por dilución, la conductividad eléctrica y la concentración de nitrato. Sodio y cloruro aparecen en mayor proporción en el agua drenada. La fracción de drenaje recuperable es del 9% que junto a una menor concentración de nitrato (90 mg L^{-1}), da una masa anual de nitrógeno exportado cinco veces menor (12 kg ha^{-1}).

La conductividad eléctrica del agua de drenaje en LASESA tiene un valor medio de $1,7 \text{ dS m}^{-1}$. La masa media de sales exportada es de 1.538 kg ha^{-1} , de las cuales sólo 38% es exportación neta. Este valor es inferior al determinado en otros regadíos por aspersión del valle del Ebro con suelos o subsuelos salinos. Las cuencas sin suelos salinos exportaron la mitad de sales por volumen de agua drenada que las que tienen algún caso de suelo salino.

El excesivo riego y fertilización del maíz hace que este cultivo sea la principal fuente de contaminación por nitrógeno. En los últimos años ha descendido la fertilización y, en consecuencia, el nitrato en el agua de drenaje. Sin embargo, los niveles actuales de nitrógeno son todavía elevados: 150 mg L^{-1} en el agua de acuífero y 95 mg L^{-1} en el agua de drenaje. La masa de nitrógeno exportada en el agua de drenaje (43 kg ha^{-1}) equivale al

26% del nitrógeno aplicado como fertilización mineral. Esta pérdida de nitrógeno esta relacionada con la eficiencia del actual riego por aspersión.

Para mejorar la eficiencia del riego se ha realizado una simulación modificando la actual programación del mismo, basada en muchos casos en pautas automáticas y días de riego consecutivos, buscando reducir el drenaje y el déficit hídrico. Se propone un cambio consistente en regar en función del contenido de agua en el suelo mediante criterios sencillos y sin variar substancialmente la gestión actual, por vales, de LASESA. La simulación reduce la alta variabilidad de la programación actual y mejora la calidad del riego, hasta alcanzar una eficiencia teórica del 83%. Con la nueva programación, no es necesario aplicar una mayor dosis de riego en los suelos con baja capacidad de almacenamiento. No existe déficit hídrico y las pérdidas por drenaje se reducen en un 8% lo que permite reducir la masa de nitrógeno exportado en un 15%. Sin embargo el volumen de riego tiene que incrementarse en un 7%. Esta simulación es combinable con la gestión de la presa de 10 hm³ recientemente construida que debería disminuir el tiempo de espera entre petición y riego.

Por último, se estima que el presente trabajo puede servir de base para futuros trabajos que analicen la evolución de este regadío por aspersión, y se recomienda continuar con el estudio para determinar la repercusión de la gestión del riego y fertilización en la cantidad y calidad del agua drenada por los sistemas de riego por aspersión.

9 Bibliografía

Bibliografía

- Abrahão, R. 2010. Impactos ambientales del riego: La transformación de la cuenca de Lerma (Zaragoza, España). Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza. Departamento de ingeniería química y tecnologías del medio ambiente. 143 pp.
- Abrahão, R., Causapé, J., García-Garizábal, I., Merchán, D., 2011a. Implementing irrigation: Water balances and irrigation quality in the Lerma basin (Spain). *Agricultural Water Management* 102, 97-104.
- Abrahão, R., Causapé, J., García-Garizábal, I., Merchán, D., 2011b. Implementing irrigation: Salt and nitrate exported from the Lerma basin (Spain). *Agricultural Water Management* 102, 105-112.
- Alberto, F., Gutiérrez, M., Ibáñez, M. J., Machín, J., Meléndez, A., Peña, J. L., Pocovi, A. y Rodríguez, J., 1984. El Cuaternario de la Depresión del Ebro en la región aragonesa. Cartografía y Síntesis de los conocimientos existentes. Universidad de Zaragoza y Estación Experimental de Aula Dei. 217 pp.
- Alberto, F., Aragüés, R., Quílez, D., 1986. Balance de sales de la cuenca del Ebro. En: Mariño, M.G. (ed) 1986. Sistema integrado del Ebro. Estudio Multidisciplinar. Gráficas Hermes. Pp: 279-291.
- Alexandratos, N., Bruinsma, J., 2012. World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision. FAO ESA 12-03. Roma. 153 pp.
- Alfaro, E., Muñoz, J., 2001. Evaluación de la infiltración en suelos del Somontano de Barbastro: comparación entre el infiltrómetro de doble anillo y de disco. Trabajo Fin de Carrera. Ingeniero Técnico Agrícola (Explotaciones Agropecuarias). Escuela Universitaria Politécnica de Huesca.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage 56. FAO. Roma. 300 pp.
- Andrés, R., Cuchí J.A., 2010. Balance de agua, sales y nitrógeno en 2008-2009. Cuenca de Malfarás (C.R. LASESA, Riegos del Alto Aragón, Huesca). XXVIII Congreso Nacional de Riegos, León. 10 pp.
- Ara, F., Monge, R., 1999. Comparación de dos métodos de infiltración: simulador de lluvia e infiltrómetro de doble anillo. Trabajo Fin de Carrera. Ingeniero Técnico Agrícola (Explotaciones Agropecuarias). Escuela Universitaria Politécnica de Huesca. 107 pp.
- Aragüés, R., 1982. Medida "in Situ" de la salinidad del suelo: aplicación al movimiento de iones inorgánicos en procesos de ascenso capilar y lavado con nivel freático constante. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, Facultad de Ciencias. Sección de Químicas, Zaragoza. 282 pp.
- Aragüés R., Tanji K., 2003. Water quality of irrigation return flows. En: *Encyclopaedia of Water Science*, Marcel Dekker Inc. 502-506.

- Aragüés, R., Urdanoz, V., Çetin, M., Kirda, C., Daghari, H., Ltifi, W., Lahlou, M., Douaik, A., 2011. Soil salinity related to physical soil characteristics and irrigation management in four Mediterranean irrigation districts. *Agricultural Water Management* 98, 959-966.
- Arenas, C., 1993. Sedimentología y paleogeografía del Terciario del margen pirenaico y sector central de la Cuenca del Ebro (zona aragonesa occidental) Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. 858 pp.
- Artigao, A., Guardado, R., 1993. El agua en el suelo. En F. Martín de Santa Olalla y J. A. De Juan (coord.). *Agronomía del riego*. Mundi-Prensa. Madrid 732 pp.
- Ayers, R.S., Westcot, D.W., 1994. Water quality for agriculture. *FAO Irrigation and Drainage* 29. Roma. 176 pp.
- Badía, D., Martí, C., Palacio, E., Sancho, C., Poch, R.M., 2009. Soil evolution over the Quaternary period in a semiarid climate (Segre river terraces, northeast Spain). *Catena* 77, 165-174. 2
- Badía, D., Palacio, J., Andrés, R., Martí, C., Cuchí, J.A., 2010. Cronosecuencia edáfica en terrazas del río Alcanadre (Los Monegros, NE-España). *Congreso Ibérico de la Ciencia del Suelo*, Granada, 773-783.
- Badía, D., Martí, C., Poch, R.M., 2011. A Soil Toposequence Characterization in the Irrigable Lands - Protected Area Contact Zone of El Basal, NE-Spain. *Arid Land Research and Management* 25, 1-18.
- Balcells, M., Dechmi, F., Isidoro, D., Claveria, I., 2010. Evaluación del impacto medioambiental de los retornos de riego de la cuenca del río Alcanadre. *XXVIII Congreso Nacional de Riegos*, León. 11 pp.
- Baldock, D., Caraveli, H., Dwyer, J., Einschütz, S., Petersen, J.E., Sumpsi-Vinas, J., Varela- Ortega, C., 2000. The Environmental Impacts of Irrigation in the European Union. A report to the Environment Directorate of the European Commission by the Institute for European Environmental Policy London in association with the Polytechnical University of Madrid and the University of Athens. 138 pp.
- Ballester, C., 2003. Aproximación al balance de aguas en la Comunidad de regantes de Lasesa. Trabajo Fin de Carrera. Ingeniero Técnico Agrícola (Explotaciones Agropecuarias). Escuela Politécnica Superior de Huesca. 94 pp.
- Ballester, C., Cuchí, J.A., Andrés, R., 2010. Resultados de un primer balance de agua, sales y nitrógeno en (2003) en la C.R. LASESA (Riegos del Alto Aragón, Huesca). *XXVIII Congreso Nacional de Riegos*, León. 10 pp.
- Barbany, A., Velez, E., 2004. Proyecto de modernización del regadío de la comunidad de regantes de LASESA T.M. Sariñena (Huesca). SEISA del Nordeste.
- Barcos, G., 1998. Estudio de la variación de la infiltración por el pisoteo del ganado y por el uso del suelo en el secano del término municipal de Lanaja (Huesca) Trabajo Fin de Carrera. Ingeniero Técnico Agrícola (Explotaciones Agropecuarias). Escuela Universitaria Politécnica de Huesca. 134 pp.

- Barros, R. 2010. Evaluación a largo plazo del balance hídrico y de la contaminación difusa (sales y nitrato) en la zona regable de La Violada (Huesca). Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. Departamento de Agricultura y Economía Agraria. 181 pp.
- Barros, R., Isidoro, D., Aragüés, R., 2011. Long-term water balances in La Violada irrigation district (Spain): I. Sequential assessment and minimization of closing errors. *Agricultural Water Management* 102, 35-45.
- Barros, R., Isidoro, D., Aragüés, R., 2012a. Three study decades on irrigation performance and salt concentrations and loads in the irrigation return flows of La Violada irrigation district (Spain). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 151, 44-52.
- Barros, R., Isidoro, D., Aragüés, R., 2012b. Irrigation management, nitrogen fertilization and nitrogen losses in the return flows of La Violada irrigation district (Spain). *Agriculture, Ecosystems & Environment* 155, 161-171.
- Betrán, J., 2006. Referencias para la fertilización nitrogenada y razonamiento del aporte del resto de nutrientes. Capítulo 5 en: Fertilización Nitrogenada. Guía de actualización. Informaciones Técnicas. Centro de Transferencia Agroalimentaria. Ed. Gobierno de Aragón. 63-77.
- Berga, A., 1993. Relaciones clima-agua-suelo-subsuelo en Monegros II. Tesis doctoral. Universitat de Lleida. Departament de Medi Ambient i Ciències del Sòl. 406 pp.
- Bjorneberg, D.L., Kanwar, R.S., Melvin, S.W., 1996. Seasonal changes in flow and nitrate-N loss from subsurface drains. *Transactions of the ASAE* 39(3), 961-976.
- Bower, C.A., Wilcox, L.V., 1965. Soluble salt En: *Methods of soil analysis. Chemical and Microbiological Agronomy* nº 9. American Society of Agronomy. Part 2, 933-951.
- Bower, H., 1986. Intake rate: cylinder infiltrometer. En: A. Klute (ed). *Methods of soil analysis. Part I: Physical and mineralogical methods*. 2nd Ed. Madison. American society of agronomy and soil science society of America, 825-844.
- Bruinsma, J., 2012. European and Central Asian Agriculture Towards 2030 and 2050, *FAO-REU Policy Studies on Rural Transition 2012-1* (Budapest, Oficina Regional para Europa y Asia Central). 23 pp.
- Cai, X., McKinney, D.C., Rosegrant, M.W., 2003. Sustainability analysis for irrigation water management in the Aral Sea region. *Agricultural Systems* 76, 1043-1066.
- Calzadilla, A., Rehdanz, K., Tol, R., 2008. Water scarcity and the impact of improved irrigation mangement: A CGE analysis. *Working Papers* 1436. 46 pp.
- Camarero, L., Catalan, J., 1993. Chemistry of bulk precipitation in the central and eastern Pyrenees, northeast Spain. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics* 27, 83-94.
- Cancela, J.J., Cuesta, T.S., Neira, X.X., Pereira, L.S., 2006. Modelling for Improved Irrigation Water Management in a Temperate Region of Northern Spain. *Biosystems Engineering* 94, 151-163.

- Castaneda, C., Angel Garcia-Vera, M., 2008. Water balance in the playa-lakes of an arid environment, Monegros, NE Spain. *Hydrogeology Journal* 16, 87-102.
- Causapé, J. 2002. Repercusiones medioambientales de la agricultura sobre los recursos hídricos de la Comunidad de regantes nº V de Bardenas (Zaragoza). Tesis doctoral. Universidad de Zaragoza. Area de Petrología y Geoquímica. 153 pp.
- Causapé, J., Quílez, D., Aragüés, R., 2004a. Assessment of irrigation and environmental quality at the hydrological basin level: I. Irrigation quality. *Agricultural Water Management* 70, 195-209.
- Causapé, J., Quílez, D., Aragüés, R., 2004b. Assessment of irrigation and environmental quality at the hydrological basin level: II. Salt and nitrate loads in irrigation return flows. *Agricultural Water Management* 70, 211-228.
- Causapé, J., Quílez, D., Aragüés, R., 2006. Irrigation efficiency and quality of irrigation return flows in the Ebro River Basin: An overview. *Environmental monitoring and assessment* 117, 451-461.
- Causapé, J., 2009a. A computer-based program for the assessment of water-induced contamination in irrigated lands. *Environmental monitoring and assessment* 158, 307-314.
- Causapé, J., 2009b. Agro-environmental evaluation of irrigation land: I. Water use in Bardenas irrigation district (Spain). *Agricultural Water Management* 96, 179-187.
- Causapé, J., 2009c. Agro-environmental evaluation of irrigation land: II. Pollution induced by Bardenas Irrigation District (Spain). *Agricultural Water Management* 96, 188-194.
- Cavero, J., Beltrán, A., Aragüés, R., 2003. Nitrate exported in drainage waters of two sprinkler-irrigated watersheds. *Journal of environmental quality* 32, 916-926.
- Cavero, J., Barros, R., Sellam, F., Topcu, S., Isidoro, D., Hartani, T., Lounis, A., Ibrikci, H., Cetin, M., Williams, J.R., Aragüés, R., 2012. APEX simulation of best irrigation and N management strategies for off-site N pollution control in three Mediterranean irrigated watersheds. *Agricultural Water Management* 103, 88-99.
- CHE, 1996. Plan Hidrológico de la Cuenca del Ebro. (disponible en: <http://oph.chebro.es/PlanHidrologico/inicio.htm>). Accedido abril 2010.
- CHE, 2011. Evaluación del impacto medioambiental de las actividades agrarias en cinco sistemas de riego de la cuenca del Ebro. Informe final del convenio de colaboración entre la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) y el Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA-DGA). 252 pp.
- Chen, X.B., Xu, L.G., Sun, Z.G., Yu, J.B., Jiang, J.H., 2011. Hydro-salinity balance and mobilization in oasis irrigation areas at two different scales. *Environmental Earth Sciences* 62, 161-169.
- Chopart, J.L., Mézino, M., Aure, F., Le Mézo, L., Mété, M., Vauclin, M., 2007. OSIRI: A simple decision-making tool for monitoring irrigation of small farms in heterogeneous environments. *Agricultural Water Management* 87, 128-138.

- Comín, F.A., Romero, J.A., Astorga, V., García, C., 1997. Nitrogen removal and cycling in restored wetlands used as filters of nutrients for agricultural runoff. *Water Science and Technology* 35, 255-261.
- Comín, F.A., 1999. Management of the Ebro River Basin: Past, present and future. *Water Science and Technology* 40, 161-168.
- Cuchí, J.A., 1989. Aportaciones al conocimiento de los suelos salinos de Aragón. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Madrid. 396 pp.
- Cuchí, J.A., 1998. Esquema general de las unidades hidrogeológicas del Alto Aragón. *Lucas Mallada* 10, 87-105.
- Cuchí, J.A., 2001. Evaluación de aguas de retorno de un perímetro de riego mecanizado en el sistema de riegos del Alto Aragón Fase I. Confederación Hidrográfica del Ebro, CHE. 84 pp.
- Cui, Z., Zhang, F., Chen, X., Dou, Z., Li, J., 2010. In-season nitrogen management strategy for winter wheat: Maximizing yields, minimizing environmental impact in an over-fertilization context. *Field Crops Research* 116, 140-146.
- David, M.B., Gentry, L.E., Kovacic, D.A., Smith, K.M., 1997. Nitrogen balance in and export from an agricultural watershed. *Journal of environmental quality* 26, 1038-1048.
- Dechmi, F., Playán, E., Faci, J.M., Tejero, M., 2003. Analysis of an irrigation district in northeastern Spain: I. Characterisation and water use assessment. *Agricultural Water Management* 61, 75-92.
- Delgado, I., Muñoz, F., 2005. La fertilización nitrogenada en el cultivo de la alfalfa. *Surcos de Aragón* 94, 34-37.
- Delgado, E., Andrés, R., 2008. Posibilidades de la construcción de pequeños embalses en las zonas regables de Aragón. XXVI Congreso Nacional de Riegos, Huesca.
- DGC, 1999. Máximas lluvias diarias en la España Peninsular. Dirección General de Carreteras (DGC). Ministerio de Fomento. Serie Monografías. 19 pp. 26 mapas.
- Díez, J.A., Caballero, R., Roman, R., Tarquis, A., Cartagena, M.C., Vallejo, A., 2000. Integrated fertilizer and irrigation management to reduce nitrate leaching in Central Spain. *Journal of environmental quality* 29, 1539-1547.
- Donner, S., Kucharik, C., Foley, J., 2004. Impact of changing land use practices on nitrate export by the Mississippi River. *Global Biogeochemical Cycles* 18, GB1028.
- Dougherty, T.C., Hall, A.W., Wallingford, H.R., 1995. Environmental impact assessment of irrigation and drainage projects. FAO, Irrigation and drainage, 53, Roma. 100 pp.
- EU, 2000. Directive 2000/60/CE of the European Parliament and of the Council establishing a framework for community action in the field of water pollution. *Official Journal L327*, 22/12/2000, 1-72.

- Faci, J., Aragues, R., Alberto, F., Quilez, D., Machin, J., Arrue, J.L., 1985. Water and salt balance in an irrigated Area of the Ebro River Basin (Spain). *Irrigation Science* 6, 29-37.
- FAO, 2006. Guidelines for soil description. 4^a edición, Roma. 97 pp.
- FAO, 2007. Coping with water scarcity. Challenge of the twenty-first century. FAO, Roma. 29 pp.
- FAO, 2009. Cómo alimentar al mundo en 2050. Foro de expertos de alto nivel, Roma, 12-13 de Octubre de 2009. 28 pp. (disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/synthesis_papers/C%C3%B3mo_alimentar_al_mundo_en_2050.pdf). Accedido en diciembre 2012.
- Farré, I., Faci, J.M. 2009. Deficit irrigation in maize for reducing agricultural water use in a Mediterranean environment. *Agricultural Water Management* 96, 383-394.
- Fell, R., 2005. Geotechnical Engineering of Dams. Taylor & Francis, London. 912 pp.
- García-Vera, M.A., 1996. Hidrogeología de zonas endorreicas En Climas semiáridos: Aplicación a Los Monegros (Zaragoza y Huesca). Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, Zaragoza. 297 pp.
- García-Vera, M.A., 2012. The application of hydrological planning as a climate change adaptation tool in the Ebro basin. *International Journal of Water Resources. Development*, DOI:10.1080/07900627.2012.747128. Taylor & Francis.
- García-Garizábal, I., Causapé, J., Abrahao, R. 2009. Evolution of the efficiency and agroenvironmental impact of a traditional irrigation land in the middle Ebro valley (2001-2007). *Spanish Journal of Agricultural Research*. 7, 465-473.
- García-Garizábal, I. 2010. Evaluación de alternativas de gestión del regadío tradicional para la reducción del impacto agroambiental. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza. Departamento de Ciencias de la Tierra. 137 pp.
- Gheysari, M., Mirlatifi, S.M., Homaei, M., Asadi, M.E., Hoogenboom, G., 2009. Nitrate leaching in a silage maize field under different irrigation and nitrogen fertilizer rates. *Agricultural Water Management* 96, 946-954.
- Goolsby, D., Battaglin, W., 2001. Long-term changes in concentrations and flux of nitrogen in the Mississippi River Basin, USA. *Hydrological Processes* 15, 1209-1226.
- Guerra, A., Guitián, F., 1968. Mapa de suelos de España: escala 1:1.000.000. Península y Baleares: descripción de las asociaciones y tipos principales de suelos. Instituto Nacional de Edafología y Agrobiología, Madrid. 126 pp.
- Haise, H.R., Donnan, W.W., Phelan, J.T., Lawhon, L.F., Shockley, D.G., 1956. The use of cylinder infiltrometers to determine the intake characteristics of irrigated soils. Agricultural Research Service (ARS) y Soil Conservation Service, USDA 41-7, Washington DC.

- Hamer, Ø., Harper, D.A.T., Ryan, P.D., 2001. PAST Paleontological Statistics Software Packaged for education and data analysis, version 2.17c. *Palaeontologia Electronica*, 4, 1.
- Herrero, J., 1982. Salinidad del suelo en salobres de Monegros y Somontano oscense como condicionante de la vegetación. Diputación Provincial, Institución Fernando el Católico, Zaragoza. 50 pp.
- Herrero, J., Rodríguez, R., Porta, J., 1989. Colmatación de drenes en suelos afectados por salinidad: finca experimental de San Juan de Flumen (Huesca). Institución Fernando el Católico, Zaragoza. 134 pp.
- Herrero, J., Boixadera, J., Danes, R., Villar, J.M., 1993. Mapa de sòls de Catalunya 1:25.000. Bellví 360-1-2 (65-28). Direcció General de Producció i Indústries Agroalimentàries. Institut Cartogràfic de Catalunya. Generalitat de Catalunya. Barcelona.
- Herrero, J. 1999. La información medioambiental ante el regadío y su modernización. En: P. Arrojó y F.J. Martínez-Gil (eds). *El agua a debate desde la Universidad*. Institución Fernando El Católico. Pp. 357-388.
- Herrero, J., Robinson, D.A., Nogués, J., 2007. A regional soil survey approach for upgrading from flood to sprinkler irrigation in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management* 93, 145-152.
- Herrero, J., 2008. Salinidad edáfica en varios salobres de Aragón. *Real Sociedad Española de Historia Natural*, Madrid. 164 pp.
- IGME, 1972. Mapa geológico 1:50.000 nº 325 Peralta de Alcofea. Instituto Geológico y Minero de España.
- IGN, 2006. Atlas nacional de España: geología, geomorfología y edafología. Instituto Geográfico Nacional (IGN). Madrid. 200 pp.
- 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. Departamento de medio ambiente y ciencias del suelo. 267 pp.
- Isidoro, D., Quílez, D., Aragüés, R., 2004. Water balance and irrigation performance analysis: La Violada irrigation district (Spain) as a case study. *Agricultural Water Management* 64, 123-142.
- Isidoro, D., Quílez, D., Aragües, R., 2006a. Environmental impact of irrigation in La Violada District (Spain): I. Salt export patterns. *Journal of environmental quality* 35, 766-775.
- Isidoro, D., Quílez, D., Aragües, R., 2006b. Environmental impact of irrigation in La Violada District (Spain): II. Nitrogen fertilization and nitrate export patterns in drainage water. *Journal of environmental quality* 35, 776-785.
- Isidoro, D., Aragüés, R., 2007. River water quality and irrigated agriculture in the Ebro basin: An overview. *International Journal of Water Resources Development* 23, 91-106.

- Isidoro, D., Quílez, D., Aragüés, R. 2010. Drainage water quality and end-member identification in La Violada irrigation district (Spain). *Journal of Hydrology* 382, 154-162.
- Isla, R., Valentin, F., Quílez, D., Guillen, M., Aibar, J., Maturano, M., 2012. Comparison of decision tools to improve the nitrogen management in irrigated maize under Mediterranean conditions in Spain. *Nutrition* , 16th.
- Israelsen, O.W., Hansen, V.E., 1962. *Irrigation principles and practices*, Wiley. Nueva York. 447 pp.
- ITGE, 1998. Mapa geológico y geomorfológico 1:50.000 nº 357 Sariñena. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.
- Jaynes, D.B., Colvin, T.S., Karlen, D.L., Cambardella, C.A., Meek, D.W., 2001. Nitrate loss in subsurface drainage as affected by nitrogen fertilizer rate. *Journal of environmental quality* 30, 1305-1314.
- Jensen, M.E., 2007. Beyond irrigation efficiency. *Irrigation Science* 25, 233-245.
- Kaddah, M.T., Rhoades, J.D., 1976. Salt and Water-Balance in Imperial-Valley, California. *Soil Science Society of America Journal* 40, 93-100.
- Klocke, N., Watts, D., Schneekloth, J., Davison, D., Todd, R., Parkhurst, A., 1999. Nitrate leaching in irrigated corn and soybean in a semi-arid climate. *Transactions of the ASAE* 42, 1621-1630.
- Kostiakov, A.N., 1932. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Transactions of 6th Congress of International Soil Science Society. Moscu* 17-21.
- Lecina, S., Playán, E., Isidoro, D., Dechmi, F., Causapé, J., Faci, J. R., 2005. Irrigation evaluation and simulation at the Irrigation District V of Bardenas (Spain). *Agricultural water management* 73, 223-245.
- Lecina, S., Aragüés, R., Playán, E., Isidoro, D., 2008. Modernización de regadíos en la Cuenca del Ebro: Efectos sobre la cantidad y calidad del agua. *Confederación Hidrográfica del Ebro CHE*. 143 pp.
- Lecina, S., Isidoro, D., Playán, E., Aragüés, R., 2009. Efecto de la modernización de regadíos sobre la cantidad y calidad de las aguas: la cuenca del Ebro como caso de estudio *Monografías INIA: Serie agrícola*, 26. 92 pp.
- Lecina, S., Isidoro, D., Playán, E., Aragüés, R., 2010a. Irrigation Modernization in Spain: Effects on Water Quantity and Quality-A Conceptual Approach. *International Journal of Water Resources Development* 26, 265-282.
- Lecina, S., Isidoro, D., Playán, E., Aragüés, R., 2010b. Irrigation Modernization and water modernization in Spain: The case of *Riegos del Alto Aragón*. *Agricultural water management* 97, 1663-1675.

- Li, X., Hu, C., Delgado, J.A., Zhang, Y., Ouyang, Z., 2007. Increased nitrogen use efficiencies as a key mitigation alternative to reduce nitrate leaching in north china plain. *Agricultural Water Management* 89, 137-147.
- Liyuan, X., Liping, C., Tianen, C., and Gao, Y., 2011. SOA-based precision irrigation decision support system. *Mathematical and Computer Modelling* 54, 944-949.
- Liso, M., Ascaso, A., 1969. Introducción al estudio de la evapotranspiración y clasificación climática de la cuenca del Ebro. Estación Experimental Aula Dei, Zaragoza. 549 pp.
- Liu, B., Zhao, W., Chang, X., Li, S., Zhang, Z., Du, M., 2010. Water requirements and stability of oasis ecosystem in arid region, China. *Environmental Earth Sciences* 59, 1235-1244.
- Lorite, I.J., Mateos, L., Orgaz, F., Fereres, E., 2007. Assessing deficit irrigation strategies at the level of an irrigation district. *Agricultural Water Management* 91, 51-60.
- MAPA, 1982. Métodos de análisis de suelos y aguas. MAPA, Servicio de Publicaciones Agrarias. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. 182 pp.
- Mariño, M.G. (ed) 1986. Sistema integrado del Ebro. Estudio Multidisciplinar. Gráficas Hermes. 728 pp.
- Martin, E.C., Loudon, T.L., Ritchie, J.T., Werner, A., 1994. Use of Drainage Lysimeters to Evaluate Nitrogen and Irrigation Management Strategies to Minimize Nitrate Leaching in Maize Production. *Transactions of the ASAE* 37, 79-83.
- Martínez-Cob, A., 2004. Revisión de las necesidades hídricas netas de los cultivos de la cuenca del Ebro. Documento interno CHE. 111 pp.
- Merriam, J.L., Keller, J. 1978. Farm irrigation system evaluation: A guide for management. Utah State University, Logan. 276 pp.
- Molden, D., 1997. Accounting for water use and productivity. International Irrigation Management Institute, Colombo Sri Lanka. 16 pp.
- Molden, D., Sakthivadivel, R., Perry, C.J., Fraiture, C., Kloezen, W.H., 1998. Indicators for Comparing Performance of Irrigated Agricultural Systems. International Water Management Institute, Colombo Sri Lanka, 26 pp.
- Moreno, D., Pedrocchi, C., Comín, F.A., García, M., Cabezas, A., 2007. Creating wetlands for the improvement of water quality and landscape restoration in semi-arid zones degraded by intensive agricultural use. *Ecological Engineering* 30, 103-111.
- Moreno-Mateos, D., Comín, F.A., Pedrocchi, C., Rodríguez-Ochoa, R., 2008. Effects of wetland construction on nutrient, SOM and salt content in semi-arid zones degraded by intensive agricultural use. *Applied Soil Ecology* 40, 57-66.
- Moreno-Mateos, D., Comin, F.A., 2010. Integrating objectives and scales for planning and implementing wetland restoration and creation in agricultural landscapes. *Journal of environmental management* 91, 2087-2095.

- Moreno-Mateos, D., Pedrocchi, C., Comín, F.A., 2010. Effects of wetland construction on water quality in a semi-arid catchment degraded by intensive agricultural use. *Ecological Engineering* 36, 631-639.
- Moreno, F., Cayuela, J.A., Fernández, J.E., Fernández-Boy, E., Murillo, J.M., Cabrera, F., 1996. Water balance and nitrate leaching in an irrigated maize crop in SW Spain. *Agricultural Water Management* 32, 71-83.
- Mur, R., 2009. El manejo del riego por aspersión en los sectores XXXI 1º y 2º de la comunidad de regantes de LASESA. Trabajo Fin de Carrera. Ingeniero Técnico Agrícola (Explotaciones Agropecuarias). Escuela Politécnica Superior de Huesca. 107 pp.
- Nichols, G.J., Hirst, J.P., 1998. Alluvial fans and fluvial distributary systems, Oligo-Miocene, northern Spain: Contrasting processes and products. *Journal of Sedimentary Research* 68, 879-889.
- Nogués, J., 2002. Mapa De Suelos (E 1:25.000) de Barbués y Torres de Barbués (Huesca), aplicaciones para modernización de regadíos. Consejo de Protección de la Naturaleza de Aragón, Zaragoza. 175 pp.
- Noory, H., van der Zee, S.E.A.T.M., Liaghat, A.-M., Parsinejad, M., van Dam, J.C., 2011. Distributed agro-hydrological modeling with SWAP to improve water and salt management of the Voshmgir Irrigation and Drainage Network in Northern Iran. *Agricultural Water Management* 98, 1062-1070.
- Ongley, E.D., 1996. Control of water pollution from agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). *Irrigation and Drainage*, 55, Roma. 112 pp.
- ONU, 2012. El futuro que queremos para todos. Agenda de Desarrollo de las Naciones Unidas Post-2015. Nueva York. 70 pp.
- Orellana, E., 1972. Prospección geoelectrica en corriente continua. Paraninfo, Madrid. 523 pp.
- Orús, F., 2003. Estiércoles, nitrógeno y cargas ganaderas: criterios para la valoración del contenido de nitrógeno de los estiércoles, según la Unión Europea. Diputación General de Aragón, Dirección General de Tecnología Agraria, Servicio de Formación y Extensión Agraria, Zaragoza 16 pp.
- Orús F., Sin, E., 2006. El balance del nitrógeno en la agricultura. Capitulo 1 en Fertilización Nitrogenada. Guía de actualización. Informaciones Técnicas. Centro de Transferencia Agroalimentaria. Ed. Gobierno de Aragón. 11-21.
- Oweis, T., Hachum, A., 2012. Supplemental irrigation, a highly efficient water-use practice. ICARDA, Aleppo, Siria. 28 pp.
- Palacio, J., 2010. Cronosecuencia edáfica en terrazas fluviales del río Alcanadre. Trabajo Fin de Carrera. Ingeniero Técnico Agrícola (Explotaciones Agropecuarias). Escuela Politécnica Superior de Huesca. 135 pp.

- Palacios, O., Escamilla, M., Reyes A., 1978. El balance de sales del distrito de Mexicali, B. C. *Natural Resources Journal* 18, 49-67.
- Perry, C.J., 1996. Quantification and measurement of a minimum set of indicators of the performance of irrigation systems. International Irrigation Management Institute. Colombo, Sri Lanka.
- Pandey, R.K., Maranville, J.W., Admou, A., 2000. Deficit irrigation and nitrogen effects on maize in a Sahelian environment. I. Grain yield and yield components. *Agricultural Water Management* 46, 1-13.
- Playán, E., Slatni, A., Castillo, R., Faci, J.M., 2000. A case study for irrigation modernisation. II. Scenario analysis. *Agricultural Water Management* 42, 335-354.
- Playán, E., Salvador, R., Faci, J.M., Zapata, N., Martinez-Cob, A., Sanchez, I., 2005a. Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. *Agricultural Water Management* 76, 139-159.
- Playán, E., Mateos, L., 2005b. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agricultural water management* 80, 100-106.
- Porta, J., 1983. Sinedares: sistema de información edafológica y agronómica de España: manual para la descripción codificada de suelos en el campo. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid. 137 pp.
- Porta, J., Lopez-Acevedo, M., Roquero, C., 1999. Edafología para la agricultura y el medioambiente. Ed. Mundi prensa, Madrid. 849 pp.
- Pulido, L., 1994. Anexo Técnico: Estudio general de salinidad analizada, In: Annual Report 1995, International Institute for Land Reclamation and Improvement, ILRI, Wageningen, The Netherlands, 44-52.
- Puliol, J., 1999. Balance nitrogenado. Trabajo Fin de Carrera. Ingeniero Técnico Agrícola (Explotaciones Agropecuarias). Escuela Universitaria Politécnica de Huesca. 99 pp.
- Quílez, D., Aragüés, R., Tanji, K., 1992. Salinity of Rivers - Transfer-Function Noise Approach. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-Asce* 118, 343-359.
- Quiñones, F., Guzmán, S., 1986. Determinación de caudal y técnicas de muestreo en agua superficial. United States Geological Survey. 67 pp.
- Quirantes, J., 1978. Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de Los Monegros. Institución Fernando el Católico, Zaragoza. 200 pp.
- RENASA, 1975. Salinidad de los suelos de la zona regable del Cinca (Huesca) sectores XXIII a XXXVII. Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario. Recursos Naturales S.A. Inédito. 101 pp.
- Ribbe, L., Delgado, P., Salgado, E., Flügel, W.-A., 2008. Nitrate pollution of surface water induced by agricultural non-point pollution in the Pocochay watershed, Chile. *Desalination* 226, 13-20.

- Ritter, W.F., Manger, K.A., 1985. Effect of Irrigation Efficiencies on Nitrogen Leaching Losses. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE* 111, 230-240.
- Robertson, W.M., Sharp, J., 2012. Variability of groundwater nitrate concentrations over time in arid basin aquifers: sources, mechanisms of transport, and implications for conceptual models. *Environmental Earth Sciences*. doi:10.1007/s12665-012-2069-1
- Roca, H., 1995. Estudio de la variabilidad espacial de la infiltración en una parcela de Pebrero (Huesca). Trabajo Fin de Carrera. Ingeniero Técnico Agrícola (Explotaciones Agropecuarias). Escuela Universitaria Politécnica de Huesca.
- Romero, J.A., Comín, F.A., García, C., 1999. Restored wetlands as filters to remove nitrogen. *Chemosphere* 39, 323-332.
- Ruiz, P., Cavero, J., Playán, E., 2008. Análisis plurianual del uso del agua de riego en la Comunidad de Regantes La Campaña (Canal del Cinca), XXVI Congreso Nacional de Riegos, Huesca. 8 pp.
- Salvador, R., Martínez-Cob, A., Cavero, J., Playán, E., 2011a. Seasonal on-farm irrigation performance in the Ebro basin (Spain): Crops and irrigation systems. *Agricultural Water Management* 98, 577-587.
- Salvador, R., Latorre, B., Paniagua, P., Playán, E., 2011b. Farmers' scheduling patterns in on-demand pressurized irrigation. *Agricultural Water Management* 102, 86-96.
- Sanchez, I., Zapata, N. and Faci, J.M., 2010. Combined effect of technical, meteorological and agronomical factors on solid-set sprinkler irrigation: I. Irrigation performance and soil water recharge in alfalfa and maize. *Agricultural Water Management* 97, 1571-1581.
- Sanz, M.J., Carratalá, A., Gimeno, C., Millán, M.M., 2002. Atmospheric nitrogen deposition on the east coast of Spain: relevance of dry deposition in semi-arid Mediterranean regions. *Environmental Pollution* 118, 259-272.
- Schoups, G., Hopmans, J.W., Young, C.A., Vrugt, J.A., Wallender, W.W., Tanji, K.K., Panday, S., 2005. Sustainability of irrigated agriculture in the San Joaquin Valley, California. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 102, 15352-15356.
- Scofield, C.S., 1940. Salt balance in irrigated areas. *Journal of Agricultural Research*. 61, 17-39.
- SCS, 1983. National soils handbook. Num. 430. Soil Conservation Service. U.S. Dept. of Agriculture, Washington D.C. 222 pp.
- Sexton, B.T., Moncrief, J.F., Rosen, C.J., Gupta, S.C., Cheng, H.H., 1996. Optimizing nitrogen and irrigation inputs for corn based on nitrate leaching and yield on a coarse-textured soil. *Journal of environmental quality* 25, 982-992.
- Singh, N.T., 2005. Irrigation and soil salinity in the Indian subcontinent: past and present. Lehigh University Press. 404 pp.

- Skhiri, A., Dechmi, F., 2012. Impact of sprinkler irrigation management on the Del Reguero river (Spain). I: Water balance and irrigation performance. *Agricultural Water Management* 103, 120-129.
- Sogbedji, J.M., van Es, H.M., Yang, C.L., Geohring, L.D., Magdoff, F.R., 2000. Nitrate leaching and nitrogen budget as affected by maize nitrogen rate and soil type. *Journal of environmental quality* 29, 1813-1820.
- SSS, 1993. Soil survey manual. Soil Survey Division Staff. Natural Resources Conservation Service, Handbook 18. U.S. Dept. of Agriculture. Washington D.C. 437 pp.
- SSS, 2010. Claves para la taxonomía de suelos. Soil Survey Staff (SSS).USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. 365 pp.
- Stamatis, G., Parpodis, K., Filintas, A., Zagana, E., 2011. Groundwater quality, nitrate pollution and irrigation environmental management in the Neogene sediments of an agricultural region in central Thessaly (Greece). *Environmental Earth Sciences* 64, 1081-1105.
- Tanji, K.K., Kielen, N.C., 2002. Agricultural drainage water management in arid and semiarid areas. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO Irrig. and Drain. 61. Roma. 188 pp.
- 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, 31-50.
- Urbano, P., 1997. Evolución del riego en cultivos herbáceos extensivos: Múltiples problemas que obligan a plantear nuevas estrategias de riego. *Vida Rural* 41, 22-28.
- Villalobos, F.J., 2002. Fitotecnia: bases y tecnologías de la producción agrícola. Mundi-Prensa, Madrid. 496 pp.
- WRG, 2009. Charting Our Water Future Economic frameworks to inform decision-making, 2030 Water Resources Group. Washington. 198 pp. (disponible en: http://www.2030waterresourcesgroup.com/water_full/Charting_Our_Water_Future_Final.pdf). Accedido en marzo 2013.
- Zalidis, G., Stamatiadis, S., Takavakoglou, V., Eskridge, K., Misopolinos, N., 2002. Impacts of agricultural practices on soil and water quality in the Mediterranean region and proposed assessment methodology. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88, 137-146.
- Zapata, N., Playán, E., 2000. Elevation and infiltration in a level basin. Characterizing variability. *Irrigation Science* 19, 155-154.
- Zapata, N., Playán, E., Martínez-Cob, A., Sánchez, I., Faci, J.M., Lecina, S., 2007. From on-farm solid-set sprinkler irrigation design to collective irrigation network design in windy areas. *Agricultural Water Management* 87, 187-199.

Zapata, N., Playan, E., Skhiri, A., Burguete, J., 2009. Simulation of a Collective Solid-Set Sprinkler Irrigation Controller for Optimum Water Productivity. Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE 135, 13-24.

Páginas web referenciadas

FAOSTAT, 2011. <http://faostat.fao.org> (noviembre 2012)

GAEZ, 2011. Global Agro-Ecological Zones <http://www.fao.org/nr/gaez/es/> (noviembre 2012)

Oficina del regante, 2011. Servicio Integral de Asesoramiento al Regante <http://servicios.aragon.es/oresa> (mayo de 2011)

CEMAS, 2011. Control del Estado de las Masas de Agua Superficiales de la Confederación Hidrográfica del Ebro <http://oph.chebro.es/DOCUMENTACION/Calidad/cemas/inicio> (mayo de 2011)

10 Índices de figuras y cuadros

Índice de figuras

Figura 3.1. Mapa de situación: Comunidad General de Riegos del Alto Aragón (RRAA) y de LASESA.	15
Figura 3. 2. Mapa de emplazamiento de los sectores de riego de LASESA.	16
Figura 3. 3. Mapa de términos municipales de LASESA.	17
Figura 4.1. Mapa Geomorfológico de LASESA según ITGE y ubicación de perfiles y ensayos de infiltración.	37
Figura 4.2. Curvas de velocidad de infiltración (negro), e infiltración acumulada (gris), en los suelos del orden Aridisol.	41
Figura 4.3. Curvas de velocidad de infiltración (negro), e infiltración acumulada (gris), en los suelos del orden Inceptisol.	42
Figura 4.4. Curvas de velocidad de infiltración (negro), e infiltración acumulada (gris), en los suelos del orden Entisol.	43
Figura 4. 5. Velocidad de infiltración media y desviación estándar de cada tipo de suelo.	45
Figura 4.6. Mapa de distribución de la velocidad de infiltración en LASESA.	46
Figura 4.7. Curvas de evolución de la infiltración acumulada de cada tipo de suelo, Aridisol (línea discontinua), Inceptisol (línea continua gris) Entisol (línea continua).	47
Figura 4.8. Mapa de distribución de intervalos de CRAD en LASESA.	54
Figura 4.9. Comparación de valores de CRAD, medidos y estimados por textura, en LASESA.	55
Figura 4.10. Mapa de suelos en LASESA.	59
Figura 4.11. Pozo y balsa muestreados.	61
Figura 4.12. Esquema de la medición de resistividad por el método de cuatro electrodos.	62
Figura 4.13. Ubicación de los puntos de muestreo de agua subterránea y de los sondeos eléctricos verticales (SEV) en LASESA.	65
Figura 4.14. Evolución del nivel freático en el pozo durante las campañas 2009 y 2010.	66
Figura 4.15. Evolución del nivel en la balsa durante las campañas 2009 y 2010.	66
Figura 4.16. Tensiones e intensidades eléctricas medidas para las 20 posiciones de los electrodos (AB) en los 3 sondeos eléctricos verticales (pozo, cabañera y trenes) y sus gráficas logarítmicas entre $AB/2$ y resistividades aparentes (ρ). Espesores y profundidad de las capas del subsuelo ajustadas por el modelo del programa WinSev6.	69
Figura 4.17. Esquema conceptual del flujo de agua subterránea en LASESA.	74
Figura 5.1 Evolución del número de riegos por semana de cada cultivo.	88
Figura 5. 2. Ejemplos seleccionados de casos de programación de riego actual para los distintos cultivos en LASESA. La línea de color gris indica hidrante en funcionamiento.	89
Figura 5.3. Evolución del número de hidrantes funcionando diariamente durante la campaña de riego y la precipitación diaria.	91
Figura 5. 4 Comparación entre las necesidades hídricas netas (NHn) y riego aplicado (R), teniendo en cuenta: a) todos los datos, b) cultivo y CRAD del suelo, c) CRAD del suelo y d) tipo de cultivo.	92

Figura 5.5. Evolución semanal de la eficiencia del riego (ER), déficit hídrico (DH), necesidades hídricas netas (NHn) y riego (R) del maíz, alfalfa y cebada con maíz a continuación durante las campañas de riego del 2009 y 2010 en LASESA.	95
Figura 5.6. Media anual del índice de aprovechamiento riego (RIS). Las barras de error indican \pm desviación estándar (DE) en los diferentes cultivos y tipos de CRAD del suelo.	96
Figura 5.7. Simulación con optimización de gestión en parcelas seleccionadas en LASESA. La línea de color gris indica funcionamiento del hidrante.	99
Figura 5. 8. Comparación entre NHn y el riego simulado (R), teniendo en cuenta: a) todos los datos, b) el cultivo y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (CRAD), c) la CRAD del suelo y d) el cultivo con la nueva propuesta de programación del riego.	101
Figura 5.9. Evolución semanal de la eficiencia del riego (ER), déficit hídrico (DH), necesidades hídricas netas (NHn) y riego (R) del maíz, alfalfa y cebada con maíz con la programación de riegos propuesta, durante las campañas de riego del 2009 y 2010.	103
Figura 6.1. Esquema conceptual del sistema cuenca y sus flujos de entrada y salida de agua	111
Figura 6. 2. Aforador en barranco de Malfarás. Cuenca C4.	112
Figura 6.3. Mapa de las cuencas y puntos de aforo en LASESA	115
Figura 6.4. Evolución del caudal en los siete barrancos y de la profundidad del nivel freático (P) entre noviembre de 2008 y diciembre de 2010.	119
Figura 6. 5. Evolución diaria de los volúmenes de agua drenada por el barranco de Malfarás, C4, (D), lluvia (P) y riego (R), entre abril de 2010 y marzo de 2011.	120
Figura 6.6. Evolución mensual de las entradas (R, P) y salidas (ET, D, PEA) de agua en las cuencas C1, C2 y C3 entre noviembre de 2008 y octubre de 2010.	123
Figura 6.7. Evolución mensual de las entradas (R, P) y salidas (ET, D, PEA) de agua en las cuencas C4, C5, C6 y C7 entre noviembre de 2008 y octubre de 2010.....	124
Figura 6.8. Usos del agua en las cuencas que drenan LASESA entre noviembre de 2008 y octubre de 2010.	127
Figura 6.9. Evapotranspiración de los cultivos en función del porcentaje de regadío de cada cuenca.	128
Figura 6.10. Drenaje en función de la capacidad de almacenamiento de agua (CRAD) media de cada cuenca.....	129
Figura 7.1. Evolución temporal de la conductividad eléctrica (CE) en aguas de drenaje y subterránea en LASESA, entre noviembre de 2008 y noviembre de 2010.	140
Figura 7.2. Análisis clúster de la evolución temporal de la CE en aguas subterráneas y de drenaje en LASESA.....	141
Figura 7.3. Ejemplo de formación de travertino “toba” en un drenaje secundario de la cuenca C2.	143
Figura 7.4. Evolución de la concentración de nitrato en LASESA entre noviembre de 2008 y noviembre de 2010.....	146
Figura 7.5. Análisis clúster de la evolución temporal de la concentración de nitrato en LASESA en 2008-2010.	147
Figura 7.6. Masa de sales exportada por volumen de drenaje y cuenca en LASESA en 2009 y 2010.	149
Figura 7.7. Agua y masa de N exportado por cuenca en LASESA durante 2009 y 2010..	156

Índice de cuadros

Cuadro 3.1. <i>Datos climatológicos 2003-2009 de Puyalón (Sariñena). Valores medios de precipitación, temperaturas máxima (T_{\max}), mínima (T_{\min}) y media (T_{med}), humedad relativa (HR), velocidad del viento (v) y evapotranspiración de referencia según FAO Penman-Monteith (ET_0).</i>	24
Cuadro 3.2. <i>Distribución de cultivos en LASESA entre los años 2003 al 2009 según las declaraciones de la PAC.</i>	27
Cuadro 4.1. <i>Localización de los ensayos de infiltración en LASESA.</i>	38
Cuadro 4.2. <i>Velocidades de infiltración estabilizada (I_f), coeficiente de variación (CV) y coeficientes de las ecuaciones de infiltración acumulada (k, a) según ensayo y tipo de suelo.</i>	44
Cuadro 4.3. <i>Resultados analíticos de los perfiles pertenecientes al subgrupo de suelos Calcic Petrocalcid.</i>	50
Cuadro 4.4. <i>Resultados analíticos de los perfiles pertenecientes a los subgrupos de suelos Typic Xerofluvent y Typic Xerorthent.</i>	51
Cuadro 4.5. <i>Resultados analíticos de los perfiles pertenecientes al subgrupo de suelos Typic Calcixerept.</i>	52
Cuadro 4.6. <i>Perfiles descritos en LASESA ordenados por CRAD.</i>	53
Cuadro 4.7. <i>Clasificación de los suelos de LASESA según Soil Taxonomy (SSS, 2010).</i>	58
Cuadro 4.8. <i>Variación mensual del almacenamiento de agua en el acuífero (ΔA) a partir del incremento en el espesor saturado (Δh).</i>	67
Cuadro 4.9. <i>Permeabilidad y Conductividad hidráulica de los materiales terciarios de LASESA mediante ensayos Lugeon.</i>	71
Cuadro 5.1. <i>Fenología del cultivo de maíz en LASESA. Fechas de siembra (D_1), inicio fases de desarrollo, intermedia y final (D_2, D_3 y D_4) y fin de ciclo (D_5).</i>	83
Cuadro 5.2. <i>Porcentaje de área, necesidades hídricas netas (NH_n), riego (R), eficiencia de riego (ER), fracción de drenaje del riego (FD_R), pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión (PEA) y déficit hídrico (DH) para los cultivos de LASESA.</i>	94
Cuadro 5.3. <i>Riego (R), eficiencia de riego (ER), fracción de drenaje del riego (FD_R), pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión (PEA) y déficit hídrico (DH) para los cultivos de LASESA regados según una programación de riego simulada.</i>	102
Cuadro 6.1. <i>Caracterización de las cuencas por superficies totales, regadas y CRAD.</i>	116
Cuadro 6.2. <i>Superficie y riego medios de cada cultivo en el regadío incluido en las siete cuencas de LASESA durante los años 2009 y 2010.</i>	117
Cuadro 6.3. <i>Volumen de agua drenado mensual por las siete cuencas de LASESA entre noviembre de 2008 y octubre de 2010.</i>	121
Cuadro 6.4. <i>Balance de agua de las siete cuencas de LASESA. Entradas (E) [precipitación (P), riego (R), vertido del canal al barranco (C)], Salidas (S) [evapotranspiración (ET), drenaje (D), perdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión (PEA)],</i>	

<i>Almacenamiento (A) [incremento de agua en el suelo (ΔS), incremento de agua en el acuífero (ΔA)] y error del balance entre noviembre de 2008 y octubre de 2010.</i>	125
<i>Cuadro 6.5. Balance de agua en el acuífero de las cuencas de LASESA entre noviembre de 2008 y octubre de 2010. Entrada: drenaje de la zona radicular o suelo (D_s), vertido de aguas sobrantes del canal (C) al barranco de los Arnales, incremento del agua almacenada en el acuífero (ΔA) y Salida: drenaje medido en los barrancos y colectores (D).</i>	126
<i>Cuadro 6.6. Balance de agua en suelo por cultivos (recuadro blanco) y balance de agua del conjunto de las cuencas (recuadro gris). Entradas (E) [precipitación (P), riego (R), vertido del canal al barranco (C)], Salidas (S) [(evapotranspiración (ET), drenaje del suelo (D_s), drenaje aforado (D), pérdidas por evaporación y arrastre del riego por aspersión (PEA)], Almacenamiento (A) [incremento de agua en el suelo (ΔS), incremento de agua en el acuífero (ΔA)] y error del balance anual medio entre noviembre de 2008 y octubre de 2010.</i>	130
<i>Cuadro 7.1. Conductividad eléctrica (CE) medida en el agua de drenaje, pozo y balsa..</i>	139
<i>Cuadro 7.2. Caracterización química del agua de riego, subterránea y de drenaje (media \pm desviación estándar) en LASESA, en 2003, 2009 y 2010: conductividad eléctrica (CE), principales iones y relación de adsorción de sodio (SAR).</i>	142
<i>Cuadro 7.3. Índices de saturación (IS) de minerales en agua de drenaje y subterránea en LASESA.</i>	144
<i>Cuadro 7.4. Concentración de nitrato [NO_3^-] del agua de drenaje y subterránea de LASESA.</i>	145
<i>Cuadro 7.5. Balance de sales medio anual en las cuencas que drenan LASESA. Entradas (E) [precipitación (S_P), riego (S_R), vertido del canal (S_C)], Salida (S) en el drenaje aforado (S_D), Almacenamiento (A) en [acuífero (ΔS_A) suelo (ΔS),] entre noviembre de 2008 y octubre de 2010.</i>	148
<i>Cuadro 7.6. Valor medio y desviación estándar de rendimiento de los cultivos, fertilización nitrogenada mineral (N_{FM}), extracción nitrogenada de los cultivos (N_E) y su relación (N_{FM}/N_E) en LASESA en 2009 y 2010. Número de encuestas (n).</i>	152
<i>Cuadro 7.7. Balance de nitrógeno medio anual en suelo (núcleo en blanco) para cada cultivo y para conjunto de cuencas de LASESA (en gris), entre noviembre de 2008 y octubre de 2010. Entradas por [precipitación (N_P), riego (N_R), fertilización mineral (N_{FM}), fertilización orgánica (N_{FO}), fijación simbiótica (N_{FS}), vertido del canal (N_C)], salidas por [extracción de los cultivos (N_E), drenaje estimado de la zona radicular o suelo (N_{DS}), drenaje aforado (N_D)] y almacenamiento en el acuífero (ΔN_A) en kg N ha^{-1}.</i>	154
<i>Cuadro 7.8. Balance de nitrógeno medio anual para cada cuenca y para su conjunto en LASESA en 2009 y 2010. Entradas por [precipitación (N_P), riego (N_R), fertilización mineral (N_{FM}), fertilización orgánica (N_{FO}), fijación simbiótica (N_{FS}), vertido del canal (N_C)], salidas por [extracción de los cultivos (N_E), drenaje aforado (N_D)] y almacenamiento en el acuífero (ΔN_A) en kg N ha^{-1}.</i>	155

11 Anejo de descripción de los perfiles de suelo

11.1. Tc Terraza Cruce

Datos generales:

Perfil: 11 Cruce

Fecha descripción: 17 de diciembre de 2009.

Término municipal: Sariñena

Descrito por: Badía, Andrés, Palacio y Cuchí.

Cartografía:

Coordenadas UTM: x: 740.178 m. y: 4.639.318 m. Huso 30

Temperatura y agua del suelo:

Régimen de humedad del suelo: Xérico

Drenaje: Bien drenado

Nivel freático: no hay

Encharcamiento: No hay

Geomorfología:

Tipo de superficie: Glacis

Pendiente: <2%

Orientación: Suroeste

Pedregosidad superficial: 50%

Afloramientos rocosos: No hay

Material originario: Material detrítico grueso sobre salagón

Vegetación: yermo



Figura 11.1. Zona de muestreo terraza Cruce.

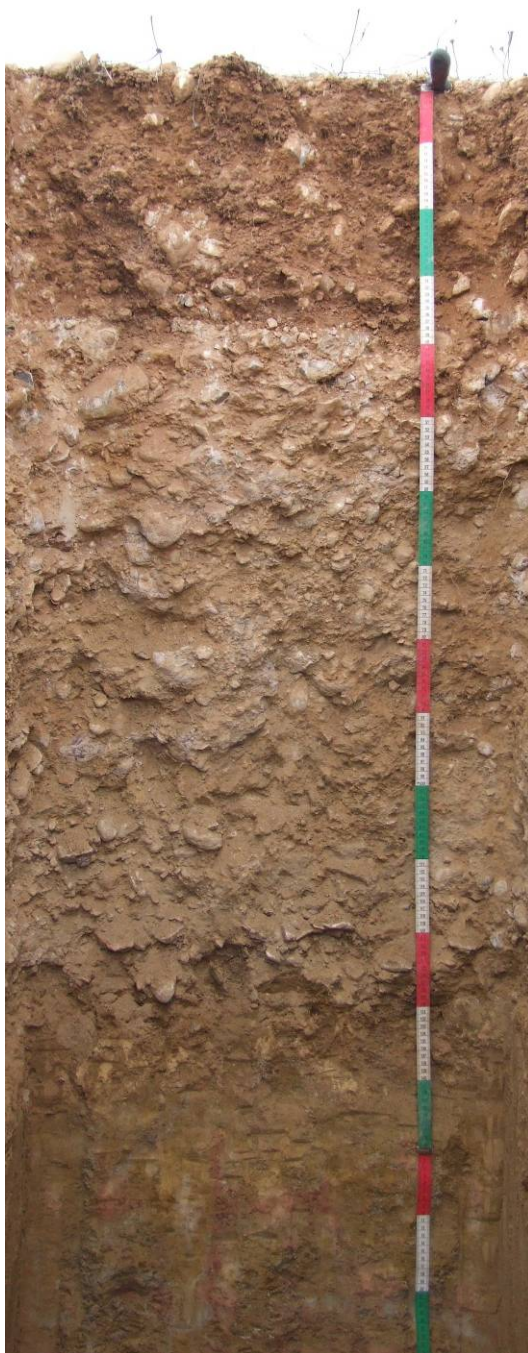


Figura 11.2. Perfil Tc Terraza cruce

0-35 cm A_p

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: 10 YR 5/3 en seco y 10 YR $\frac{3}{4}$ en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: 20%, de menos de 6 cm y litología poligénica. TEXTURA: Franca. ESTRUCTURA: Granular. COMPACIDAD: Moderadamente compacto. CEMENTACIONES: No cementado. SISTEMA RADICULAR: Pocas, finas y muy finas. GRIETAS: No hay. ACUMULACIONES: No hay. LÍMITE INFERIOR: Abrupto, plano. EPIPEDIÓN: Óchrnico.

35-70 cm B_{km}

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: 10 YR 8/2 en seco y 10 YR 5/6 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: 60%, de litología poligénica. ESTRUCTURA: Masiva. COMPACIDAD: Muy compacto. CEMENTACIONES: Cementado. SISTEMA RADICULAR: No hay. GRIETAS: No hay. ACUMULACIONES: de carbonato cálcico. LÍMITE INFERIOR: Abrupto irregular. ENDOPEDIÓN: Petrocálcico

70-130 cm C_k

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: 10 YR 8/2 en seco y 10 YR 5/3 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: 70%, de litología poligénica. TEXTURA: Arenosa. ESTRUCTURA: Masiva. COMPACIDAD: Moderadamente compacto. CEMENTACIONES: No cementado. SISTEMA RADICULAR: No hay. GRIETAS: No hay. ACUMULACIONES: de carbonato cálcico. LÍMITE INFERIOR: Abrupto plano. ENDOPEDIÓN: Cálcico

130->200 cm 2C_k

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: 10 YR 8/4 en seco y 10 YR 5/4 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: No hay. TEXTURA: Arcillosa. ESTRUCTURA: Apedial. COMPACIDAD: Moderadamente compacto. CEMENTACIONES: No cementado. SISTEMA RADICULAR: No hay. GRIETAS: No hay. ACUMULACIONES: Pseudomicelios y rizoconcreciones de carbonato cálcico, en la parte superior.

11.2. Val Lastanosa

Datos generales

Perfil: 10 Lastanosa

Fecha descripción: 17 de diciembre de 2009.

Término municipal: Sariñena

Descrito por: Badía, Andrés, Palacio y Cuchí.

Cartografía:

Coordenadas UTM: x: 741.980 m. y: 4.637.762 m. Huso 30

Temperatura y agua del suelo:

Régimen de humedad del suelo: Xérico

Drenaje: bien drenado

Nivel freático: no hay

Encharcamiento: no hay

Geomorfología:

Tipo de superficie: Val

Pendiente: 2%

Orientación: Oeste

Pedregosidad superficial: <1%

Afloramientos rocosos: no hay

Material originario: Depósito detrítico

Vegetación: sisallar



Figura 11.3. Zona de muestreo val Lastanosa.

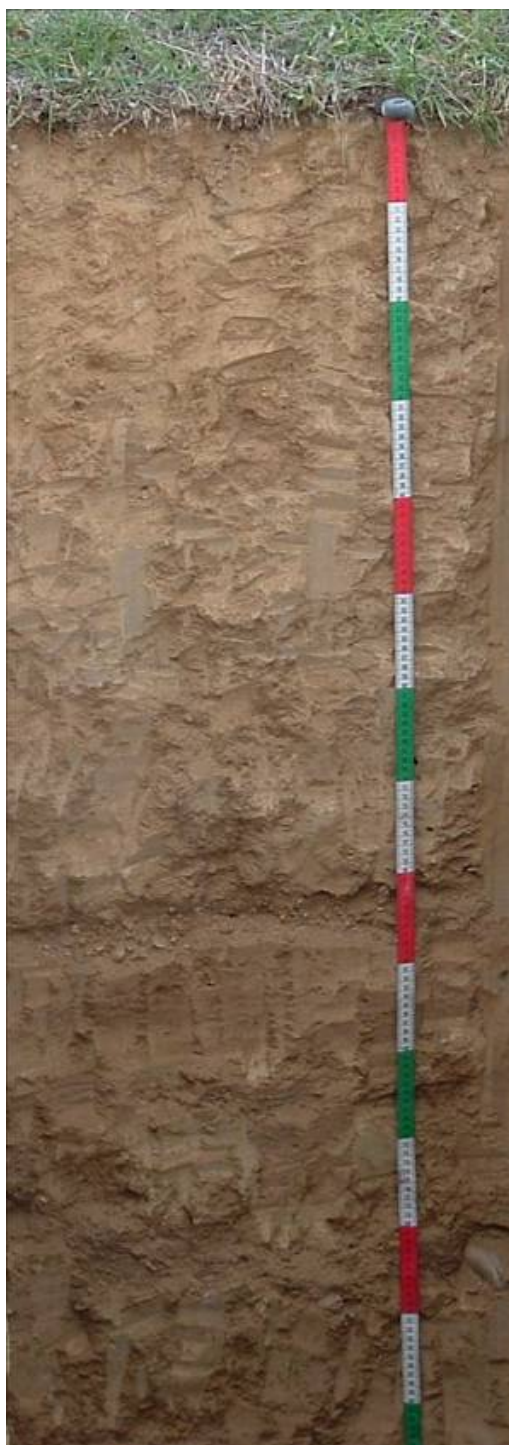


Figura 11.4. Perfil Val Lastanosa

0-30 cm A_h

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: 10 YR 6/4 en seco y 10 YR 4/4 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: <1%. TEXTURA: franca ESTRUCTURA: Débil, en bloques subangulares de tamaño grueso. COMPACIDAD: Moderadamente compacto. CEMENTACIONES: No cementado. GRIETAS: No hay. ACUMULACIONES: No hay. LÍMITE INFERIOR: Gradual, plano. EPIPEDIÓN: Óchrico.

30-80 cm C

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: 10 YR 6/4 en seco y 10 YR 5/4 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: <1%. TEXTURA: franco-limosa. ESTRUCTURA: Laminar. COMPACIDAD: Muy compacto. CEMENTACIONES: No cementado. ACTIVIDAD BIOLÓGICA: Lombrices. GRIETAS: No hay. ACUMULACIONES: No hay. LÍMITE INFERIOR: Abrupto, plano.

80-130/140 cm 2C

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: 10 YR 7/4 en seco y 10 YR 5/6 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: porcentaje heterogéneo, de <1cm, en lentejones o bandas y de naturaleza poligénica. TEXTURA: franca. ESTRUCTURA: Fuerte, laminar. CEMENTACIONES: No cementado. ACTIVIDAD BIOLÓGICA: Lombrices. GRIETAS: No hay. ACUMULACIONES: No hay. LÍMITE INFERIOR: Abrupto, ondulado.

130/140-170 cm 3C_k

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: 10 YR 6/4 en seco y 10 YR 5/4 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: <1%. TEXTURA: franco-arcillosa. ESTRUCTURA: De débil a moderada, en bloques subangulares de tamaño medio. ACTIVIDAD BIOLÓGICA: Lombrices. GRIETAS: No hay. ACUMULACIONES: Pseudomicelios.

11.3. Val Cajal

Datos generales

Perfil: 7 Barranco Cajal

Fecha descripción: 17 de diciembre de 2009.

Término municipal: Sena

Descrito por: Badía, Andrés y Palacio.

Cartografía:

Coordenadas UTM: x: 745.081 m. y: 4.625.456 m. Huso 30

Temperatura y agua del suelo:

Régimen de humedad del suelo: Xérico

Drenaje: Bien drenado

Nivel freático: Inexistente

Encharcamiento: Inexistente

Geomorfología:

Tipo de superficie: Val

Pendiente: <2%, casi llano

Orientación: Sur

Pedregosidad superficial: 5%, de menos de 5cm

Afloramientos rocosos: No hay

Material originario: Areniscas y limos. Depósito detrítico grueso sobre lutitas versicolor

Costra superficial: Fina

Vegetación: colza



Figura 11.5. Zona de muestreo val Cajal.



Figura 11.6. Perfil Val Cajal

0-25 cm Ap

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: 10 YR 6/3 en seco y 10 YR 4/3 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Porcentaje total: 5%, de menos de 6 cm, forma redondeada-tabular y redondeada-plana, sin orientación definida, distribución regular y de litología poligénica. TEXTURA: franco-limosa. ESTRUCTURA: Suela de labor. COMPACIDAD: Muy poco compacto. CEMENTACIONES: No cementado. SISTEMA RADICULAR: Frecuentes raíces, de tamaño fino. ACTIVIDAD BIOLÓGICA: Abundante rastrojo enterrado. GRIETAS: No hay. ACUMULACIONES: No hay. LÍMITE INFERIOR: Abrupto, plano. EPIPEDIÓN: Óchrico.

25-50 cm A/C

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: 10 YR 6/4 en seco y 10 YR 5/4 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Porcentaje total: 10%, de menos de 6 cm, forma redondeada-tabular y redondeada-plana, sin orientación definida, distribución aumentando en profundidad y de litología poligénica. TEXTURA: franca. ESTRUCTURA: Débil en bloques subangulares de tamaño mediano. COMPACIDAD: Poco compacto. CEMENTACIONES: No cementado. SISTEMA RADICULAR: Muy pocas raíces. ACTIVIDAD BIOLÓGICA: No hay. GRIETAS: No hay. ACUMULACIONES: No hay. LÍMITE INFERIOR: Neto, plano.

50-70 cm C

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: 10 YR 7/4 en seco y 10 YR 4/3 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Porcentaje total: 70%, de menos de 6 cm, forma redondeada-tabular y redondeada-plana, con orientación horizontal oblicua, distribución regular y de litología poligénica. TEXTURA: franco-arenosa. ESTRUCTURA: Inexistente por abundancia de elementos gruesos. CEMENTACIONES: No cementado. SISTEMA RADICULAR: No hay. ACTIVIDAD BIOLÓGICA: No hay. GRIETAS: No hay. ACUMULACIONES: No hay. LÍMITE INFERIOR: Abrupto, plano.

70- >100 cm 2C

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: 10 YR 8/3 en seco y 10 YR 5/4 en húmedo. MANCHAS: Litocromas. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: No hay. TEXTURA: arcillo-limosa. CEMENTACIONES: No cementado. SISTEMA RADICULAR: No hay. ACTIVIDAD BIOLÓGICA: No hay. GRIETAS: No hay. ACUMULACIONES: No hay.

11.4. Picardón

Datos generales

Perfil: 1 Picardón

Fecha descripción: 11 de julio de 2010

Término municipal: Sariñena

Descrito por: Andrés y Cuchí

Cartografía:

Coordenadas UTM: x: 739.961 m. y: 4.639.276 m. Huso 30

Temperatura y agua del suelo:

Régimen de humedad del suelo: Xérico

Drenaje: Pobre, muy poco permeable

Nivel freático: Inexistente

Encharcamiento: Inexistente

Geomorfología:

Tipo de superficie: Ladera rectilínea

Pendiente: 2%, ligeramente ondulado

Orientación: sur

Pedregosidad superficial: 5%

Afloramientos rocosos: No hay

Material originario: Areniscas, arcillas y limolitas

Costra superficial, laminar, gruesa (5mm), ligeramente dura

Vegetación: campo abandonado, ontina, esparto.



Figura 11.7. Zona de muestreo Picardón.



Figura 11.8. Perfil Picardón

0-20 cm Ap

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: en seco 10YR 7/4, en húmedo 10YR 3,5/3. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Porcentaje total: 1%,. TEXTURA: franca. ESTRUCTURA: Maciza. COMPACIDAD: Muy compacto. CEMENTACIONES: No cementado. SISTEMA RADICULAR: Frecuentes raíces, de tamaño finas (en el límite entre horizontes) y muy finas. MATERIA ORGÁNICA: Muy poca. ACTIVIDAD BIOLÓGICA: Pocas hormigas. GRIETAS: No hay. ENSAYOS DE CAMPO: En la matriz, respuesta al HCl (11%), moderada. ACUMULACIONES: No hay. LÍMITE INFERIOR: Gradual, plano. EPIPEDIÓN: Óchrico.

20-45 cm A/C

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: en seco 10YR 7/4, en húmedo 10YR 5/3. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Porcentaje total: 3%,. TEXTURA: limo-arenosa. ESTRUCTURA: Moderada, en bloques subangulares de tamaño grueso. COMPACIDAD: De moderado a muy compacto. CEMENTACIONES: No cementado. SISTEMA RADICULAR: Pocas raíces, de tamaño muy fino. MATERIA ORGÁNICA: Muy poca. ACTIVIDAD BIOLÓGICA: Pocas hormigas. GRIETAS: No hay. ENSAYOS DE CAMPO: En la matriz, respuesta al HCl (11%), alta. ACUMULACIONES: No hay. LÍMITE INFERIOR: Abrupto, plano.

45-55 cm C₁

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: en seco 2,5Y 6,5/3, en húmedo 2,5Y 4/4. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: No hay. TEXTURA: franco-limosa. ESTRUCTURA: Masiva. COMPACIDAD: Extraordinariamente compacto. CEMENTACIONES: No cementado. SISTEMA RADICULAR: Muy pocas raíces, de tamaño muy fino, en las grietas. MATERIA ORGÁNICA: Inapreciable. ACTIVIDAD BIOLÓGICA: No hay GRIETAS: Finas, escasas. ENSAYOS DE CAMPO: En la matriz, respuesta al HCl (11%), alta. ACUMULACIONES: No hay. LÍMITE INFERIOR: Abrupto, plano.

55-75 cm C₂

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: en seco 2,5Y 7/3, en húmedo 2,5Y 5/3. MANCHAS: Pocas, de colores grises. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: No hay. TEXTURA: franco-limosa. ESTRUCTURA: Masiva. COMPACIDAD: Extraordinariamente compacto. CEMENTACIONES: No cementado. SISTEMA RADICULAR: Muy pocas raíces, de tamaño muy fino, en las grietas. MATERIA ORGÁNICA: Inapreciable. ACTIVIDAD BIOLÓGICA: No hay GRIETAS: Finas, escasas. ENSAYOS DE CAMPO: En la matriz, respuesta al HCl (11%), alta. ACUMULACIONES: No hay. LÍMITE INFERIOR: Gradual, plano.

75-100 cm C₃

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: en seco 10YR 8/3, en húmedo 10YR 4/3. MANCHAS: Abundantes, de colores rojas y muy contrastadas. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: No hay. TEXTURA: arcillo-limoso. ESTRUCTURA: Laminar, de tamaño medio, heredada. COMPACIDAD: Extraordinariamente compacto. CEMENTACIONES: No cementado. SISTEMA RADICULAR: No hay. MATERIA ORGÁNICA: No hay. ACTIVIDAD BIOLÓGICA: No hay GRIETAS: No hay. ACUMULACIONES: No hay.

11.5. Ladera Gk Almunias altas

Datos generales

Perfil: 1

Fecha descripción: 7 de octubre de 2009.

Término municipal: Sariñena

Descrito por: Badía, Andrés y Pérez.

Cartografía:

Coordenadas UTM: x: 740.846 m. y: 4.632.570 m. Huso 30

Temperatura y agua del suelo:

Régimen de humedad del suelo: Xérico

Drenaje: Bien drenado

Nivel freático: Inexistente

Encharcamiento: Inexistente

Geomorfología:

Tipo de superficie: Glacis

Pendiente: 5%

Orientación: Oeste

Pedregosidad superficial: 30%

Afloramientos rocosos: No hay

Material originario: Coluvio sobre margas

Vegetación: rastrojo



Figura 11.9. Zona de muestreo almunias altas.



Figura 11.10. Perfil Gk Ladera almunias altas

0-10 cm Ap₁

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: 7,5 YR 6/4 en seco y 7,5 YR 3/3 en húmedo
MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Porcentaje total: 15%, de menos de 6 cm, sin orientación definida y de naturaleza caliza. TEXTURA: franco-arcillosa. ESTRUCTURA: Suela de labor. COMPACIDAD: Muy poco compacto. CEMENTACIONES: No cementado. ACTIVIDAD BIOLÓGICA: Pocas lombrices. ENSAYOS DE CAMPO: En la matriz, respuesta al HCl (11%), alta. ACUMULACIONES: No hay. LÍMITE INFERIOR: Abrupto, plano. EPIPEDIÓN: Óchrico.

10-40/50 cm Ap₂

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: 7,5 YR 6/3 en seco y 5 YR 4/4 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Porcentaje total: 15%, de menos de 6 cm, sin orientación definida y de naturaleza caliza. TEXTURA: franco-arcillosa. ESTRUCTURA: Gruesa, granular. COMPACIDAD: poco compacto. CEMENTACIONES: No cementado. ACTIVIDAD BIOLÓGICA: Pocas lombrices. ENSAYOS DE CAMPO: En la matriz, respuesta al HCl (11%), alta. ACUMULACIONES: No hay. LÍMITE INFERIOR: Abrupto, plano. EPIPEDIÓN: Óchrico.

40/50-80 cm Bwk₁

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: 10 YR 7/3 en seco y 7,5 YR 5/6 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Porcentaje total: 10%, de menos de 6 cm. TEXTURA: franco-arenosa. ESTRUCTURA: Débil, en bloque subangulares. COMPACIDAD: Moderadamente compacto. CEMENTACIONES: No cementado. ACTIVIDAD BIOLÓGICA: No hay. ENSAYOS DE CAMPO: En la matriz, respuesta al HCl (11%), muy alta. ACUMULACIONES: Pseudomicelios. LÍMITE INFERIOR: Difuso, plano. EPIPEDIÓN: Cálcico.

80-110 cm Bwk₂

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: 10 YR 7/3 en seco y 7,5 YR 5/6 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Porcentaje total: 10%, de menos de 6 cm. TEXTURA: franco-arenosa. ESTRUCTURA: Débil, en bloque subangulares. COMPACIDAD: Moderadamente compacto. CEMENTACIONES: No cementado. ACTIVIDAD BIOLÓGICA: No hay. ENSAYOS DE CAMPO: En la matriz, respuesta al HCl (11%), muy alta. ACUMULACIONES: Pseudomicelios y cemento geopetal. LÍMITE INFERIOR: Neto, plano. EPIPEDIÓN: Cálcico.

110-140 cm Ck

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: 10 YR 8/3 en seco y 10 YR 5/4 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Porcentaje total: 10%, de menos de 6 cm. TEXTURA: franco-arenosa.. COMPACIDAD: poco compacto. CEMENTACIONES: No cementado. ACTIVIDAD BIOLÓGICA: No hay. ENSAYOS DE CAMPO: En la matriz, respuesta al HCl (11%), moderada. ACUMULACIONES: Cemento geopetal. LÍMITE INFERIOR: Muy abrupto, plano.

140-200 cm 2C

ESTADO HUMEDAD: Seco. COLOR: 10 YR 6/4 en seco y 7,5 YR 5/4 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: No hay. TEXTURA: franco-arenosa. COMPACIDAD: poco compacto. CEMENTACIONES: No cementado. ACTIVIDAD BIOLÓGICA: No hay. ENSAYOS DE CAMPO: En la matriz, respuesta al HCl (11%), moderada. ACUMULACIONES: No hay

11.6. Ladera Go Cruz del Serrat

Datos generales

Perfil: 8

Fecha descripción: 17 de diciembre de 2009

Término municipal: Sariñena

Descrito por: Badía, Andrés y Palacio

Cartografía:

Coordenadas UTM: X: 739.289 m Y: 4.634.709 m Huso 30

Temperatura y agua del suelo:

Régimen de humedad del suelo: Xérico

Drenaje: Bien drenado

Nivel freático: Inexistente

Encharcamiento: Inexistente

Geomorfología:

Tipo de superficie: Glacis

Pendiente: 5%

Orientación: Oeste

Pedregosidad superficial: 2-5% Tamaño de las piedras: 2-6 cm

Afloramientos rocosos: No hay

Material originario: Material detrítico fino sobre limolitas

Vegetación: alfalfa



Figura 11.11. Zona de muestreo ladera Go.



Figura 11.12. Perfil Go Ladera cruz del Serrat

0-20 cm Ap₁

ESTADO HUMEDAD: Ligeramente húmedo. COLOR: 7,5 YR 6/3 en seco y 7,5 YR 3/3 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Porcentaje total: 10%. TEXTURA: franco-arcillosa. ESTRUCTURA: Bloques subangulares. CEMENTACIONES: No cementado. SISTEMA RADICULAR: Raíces frecuentes, de 4mm. ACUMULACIONES: No hay. LÍMITE INFERIOR: Gradual. EPIPEDIÓN: Óchrico.

20-50 cm Ap₂

ESTADO HUMEDAD: Ligeramente húmedo. COLOR: 7,5 YR 6/4 en seco y 7,5 YR 3/3 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Porcentaje total: 20%. TEXTURA: franco-arcillosa. ESTRUCTURA: Bloques subangulares. CEMENTACIONES: No cementado. SISTEMA RADICULAR: Raíces frecuentes, de 2mm. ACUMULACIONES: No hay. LÍMITE INFERIOR: Abrupto, plano. EPIPEDIÓN: Óchrico.

50-75 cm Bwk

ESTADO HUMEDAD: Húmedo. COLOR: 10 YR 7/4 en seco y 10 YR 6/6 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Porcentaje total: 25%. TEXTURA: franco-arcillosa. CEMENTACIONES: No cementado. ACUMULACIONES: Rizoconcreciones blandas. LÍMITE INFERIOR: Neto, plano. ENDOPEDIÓN: Cálculo.

75-110 cm Bk₁

ESTADO HUMEDAD: Húmedo. COLOR: 7,5 YR 8/3 en seco y 7,5 YR 6/6 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Porcentaje total: 10%. TEXTURA: franco-arcillosa. CEMENTACIONES: No cementado. ACUMULACIONES: Cemento geopetal, blandas. LÍMITE INFERIOR: Gradual. ENDOPEDIÓN: Cálculo.

110-130 cm Bk₂

ESTADO HUMEDAD: Húmedo. COLOR: 10 YR 8/3 en seco y 10 YR 6/6 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: Porcentaje total: 10%. TEXTURA: franco-arcillosa. CEMENTACIONES: No cementado. ACUMULACIONES: En el contacto, cemento geopetal, blandas. LÍMITE INFERIOR: neto, plano. ENDOPEDIÓN: Cálculo.

>130 cm C

ESTADO HUMEDAD: Húmedo. COLOR: 10 YR 7/4 en seco y 10 YR 5/6 en húmedo. MANCHAS: No hay. ESTADO DE OXIDOREDUCCIÓN: Oxidado. ELEMENTOS GRUESOS: No hay TEXTURA: franco-arenosa. CEMENTACIONES: No cementado.