

ECONOMIA DEL AGUA EN SISTEMAS DE SECANO MEDITERRÁNEOS

C. Cantero-Martínez ¹, D. Moret ², J. Lampurlanés ³

¹ Departamento de Producción Vegetal y Ciencia Forestal. Universidad de Lleida.
Avda. Rovira Roure, 191, 25198 Lleida

² Estación Experimental de Aula Dei. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).
Avda. Montañana, 1005, 50059 Zaragoza

³ Departamento de Ingeniería Agroforestal. Universidad de Lleida.
Avda. Rovira Roure, 191, 25198 Lleida

1. Introducción

El agua es el factor de producción básico e indispensable para la producción agrícola. En regadío la disponibilidad de agua para la actividad agrícola y en particular para el crecimiento de los cultivos suele ser mayor y menos limitante que en zonas de secano. En estas zonas las estrategias tanto agronómicas como hidráulicas van encaminadas a mejorar aspectos de distribución y de eficiencia del agua aplicada. En las zonas de secano, sin embargo, el agua disponible para los cultivos es la contribución casi exclusiva de la lluvia o pluviometría. Por ello, la mejor estrategia es optimizar al máximo la captación del agua y el uso por parte de las plantas.

En las condiciones de secano Mediterráneas, como son casi todas las de España, las cantidades de pluviometría recogidas son bajas e irregulares y limitan la disponibilidad del agua para todas las actividades humanas. Por ello el agua, se convierte en un recurso limitante para la actividad agrícola que utiliza entre el 70 y 80 % de los recursos hídricos.

Muchas zonas de secano en las que por propia definición no hay posibilidad de aplicación de agua, son zonas donde la aridez es habitual debido al clima. El clima mediterráneo se caracteriza por las limitadas aportaciones de pluviometría y por su irregularidad tanto inter-anual (entre los años de una serie) como intra-anual (distribución mensual y por períodos dentro del año). Por otro lado, el viento y la alta insolación que incrementan la evaporación y la transpiración, agravan las condiciones de falta de agua convirtiendo estas zonas de secano en zonas áridas y semiáridas.

También los suelos juegan un papel importante en las posibilidades hídricas de los cultivos por su capacidad de almacenamiento según sus características físicas, químicas y biológicas. Si bien hay variedad en la calidad de los suelos de las zonas mediterráneas, es habitual encontrar suelos de poca profundidad, con bajos niveles de materia orgánica, con estructura degradada, con salinidad e incluso alcalinidad, que agravan todavía más las condiciones de aridez y por lo tanto incrementan las limitaciones para la actividad agrícola y en especial para el desarrollo de los cultivos.

2. Estrategias agronómicas para las zonas áridas y semiáridas Mediterráneas de secano.

En la producción de los cultivos, el rendimiento de estos, está directamente relacionado con la energía que recibe y el agua y los nutrientes que absorben. En condiciones de secano, y donde la energía y los nutrientes no son limitantes, el agua es el principal factor de producción de las plantas. Esto es lo que sucede en las zonas de secano mediterráneas. Como se ha citado, en las zonas de secano (y más en las áridas y semiáridas con menos de 450 mm de pluviometría anual), el agua disponible para los cultivos es la que aporta la pluviometría y por ello la estrategia agronómica es maximizar la producción por unidad de agua disponible (en este caso la lluvia). Para ello debemos mejorar todos los componentes que afectan al balance hídrico del sistema suelo-cultivo. Esto es en primer lugar, incrementar la capacidad de captación de agua del suelo evitando la escorrentía. Se debe, si es posible, incrementar la capacidad de almacenamiento de agua del suelo, evitar las pérdidas por drenaje. Se debe también, evitar las pérdidas por evaporación directa del suelo y limitar la capilaridad protegiendo el suelo de la acción evaporante del sol y del ambiente y reduciendo por tanto la transferencia de vapor de agua del suelo a la atmósfera. Finalmente es muy importante que el agua almacenada en el suelo sea utilizada al máximo por el cultivo, ajustando su ciclo a los momentos de disponibilidad y eligiendo aquellas especies con características que limiten la evaporación y favorezcan la transpiración eficiente.

Las zonas mediterráneas han sido cultivadas desde hace siglos y han utilizado técnicas agrícolas para conseguir esta mejora en la utilización del agua. El abancalamiento y aterrazamiento que han modelado el paisaje agrícola mediterráneo y que en la mayoría de los casos fue realizado hace siglos a base de trabajo manual, son un ejemplo de la intervención humana. Con ello se consigue mayor cantidad agua acumulada y menor pérdida por escorrentía, que como ventaja añadida tiene la formación de suelo agrícola y evita la pérdida del mismo. Esto que nuestros antepasados construyeron, se ha destruido en algunas zonas por una mecanización más efectiva y para una mayor comodidad de las prácticas agrícolas, pero que va en perjuicio de la calidad del suelo, de la conservación del agua y en definitiva de la sostenibilidad de los sistemas agrícolas de secano. A pesar de ello, hay ya medidas agroambientales de protección que están fomentando la reconstrucción y el mantenimiento de terrazas.

Otros sistemas de cultivo que van en la línea de la mejora en la eficiencia del uso del agua son: el barbecho, las rotaciones de cultivo y la utilización de cultivos cubierta. Y entre las técnicas de cultivo que pueden utilizarse para mejorar el uso del agua disponible se pueden citar: la elección de cultivares adaptados con ciclo sincronizado a los momentos de mayor agua disponible o con sistemas radiculares más efectivos en la captación de agua; el uso racional de la fertilización, ajustado a las disponibilidades y consumo de agua de los cultivos; las dosis de siembra que ajustan la densidad a las disponibilidades del agua; el control de malas hierbas, etc.

Finalmente tenemos las prácticas de manejo de suelo, que podrían considerarse entre las más importantes para la mejora de la eficiencia de captación y uso de los recursos hídricos en las zonas mediterráneas. Entre las posibles prácticas está el laboreo de conservación con sus diferentes variantes y que se ha convertido en pilar fundamental

y definitorio de la actualmente denominada “Agricultura de Conservación”. Las diversas variantes de sistemas de laboreo de conservación (laboreo reducido o mínimo, laboreo a bandas, etc), que tienen en el no laboreo y la siembra directa), la variedad más reducida de la intervención sobre el suelo, tienen en común la mejora en la captación, conservación y mejor uso por los cultivos del agua disponible; a parte de otras ventajas que serán ampliamente definidas y valoradas en otros capítulos de este libro.

Los sistemas de laboreo de conservación y las técnicas de agricultura de conservación van directamente encaminadas a promover la mejora en la disponibilidad de agua por parte del cultivo.

3. Principios básicos para la acumulación y conservación de agua en el suelo (infiltración y evaporación).

Desde el desarrollo de los sistemas y técnicas de laboreo de conservación en la primera mitad del siglo pasado en EEUU, ha habido numerosos estudios científicos y referencias prácticas que han cuantificado las ventajas de estas técnicas sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, que junto con los estudios en fisiología de cultivos que evalúan la respuesta del cultivo, determinan la mejora del uso del agua en la producción final y el rendimiento (McCalla and Army, 1961; Unger and McCalla, 1980; Lal, 1989; Blevins et al., 1993).

Los principios básicos explicados en estos estudios de revisión y en otras muchas citas detectan que, en general, la acumulación del agua en el suelo es mayor en sistemas de laboreo de conservación dado que: (1) hay una mayor infiltración (aunque no en todos los casos) y una mayor oportunidad de infiltración, (2) una menor escorrentía, (3) un incremento de la capacidad de almacenamiento del suelo por cambios estructurales físicos (mejora de la agregación y cambios en la distribución de los conductos de circulación del agua-poros) o biológicos (incremento de la cantidad de poros por actividad de fauna como las lombrices, etc.) del mismo; (4) una menor evaporación.

Uno de los principios básicos de la Agricultura de Conservación, como ya se habrá desarrollado en otros capítulos, para la mejora de la captación, conservación y uso eficiente del agua de estos sistemas o técnicas se deriva del mantenimiento de los residuos vegetales sobre el suelo. Su permanencia y descomposición lenta es importante para diversos aspectos, pero es fundamental para la economía del agua en el sistema suelo-planta

Los efectos del mantenimiento de los residuos se podrían dividir en efectos directos e indirectos. Entre los efectos directos, se ha observado que los residuos reducen la evaporación dado que impiden la incidencia directa de la radiación sobre el suelo húmedo y la reducción de la transferencia turbulenta de vapor a la atmósfera. Otro efecto de los residuos es que limitan la velocidad del agua por encima del suelo disminuyendo la escorrentía y aumentando el tiempo de oportunidad para infiltración. Al ser mayor el tiempo de oportunidad de infiltración, aumenta la posibilidad de circulación del agua a zonas profundas del suelo. Un tercer aspecto es que el residuo protege el suelo desnudo del impacto directo de las gotas de lluvia que disgregan los agregados y produce un sellado de la superficie del suelo (encostramiento) que limita la infiltración e incrementa la escorrentía.

Los efectos indirectos del residuo sobre la económica del agua son a través del incremento de la materia orgánica del suelo, su estructuración física y el incremento de la actividad biológica. La materia orgánica en la capa superficial del suelo mejora la resistencia a la disgregación del suelo y evita la posibilidad de encostramiento. La estructuración de los horizontes sub-superficiales del suelo (eliminación de suelas de labor, etc.) suponen un incremento en la capacidad de almacenar agua y una mejor circulación a las zonas más profundas del suelo, donde el agua queda a disposición de las raíces del cultivo (transpiración) pero no de la evaporación directa. Se limita la erosión que es pérdida de suelo, lo que significa perder partículas que en su agregación pueden almacenar agua. Finalmente la materia orgánica es el alimento de determinada fauna del suelo como son las lombrices, que generan galerías y poros donde circula el agua para acumularse en profundidad, donde será mejor utilizada por el cultivo.

Aun a pesar de que las bases y los principios básicos explicados son de aplicación general, se necesitan estudios locales para cuantificar específicamente las ventajas y el porque de las mismas en cada sistema de cultivos, cultivo y sistema de producción. Por ello se siguen realizando estudios que corroboran los principios básicos pero que nos permiten establecer variaciones prácticas para conseguir mejores ventajas en el funcionamiento de estos sistemas de manejo de suelo.

Es por ello que, en este capítulo, no se pretende hacer una exposición generalista de los principios básicos, sino ver las ventajas y limitaciones de las técnicas y sistemas de laboreo de conservación en algunos de los sistemas agrícolas españoles donde se han estudiado o se utilizan estas técnicas para determinar las recomendaciones de uso.

Desde el comienzo del desarrollo de estas técnicas en España, ha habido diversos estudios que han mostrado sus ventajas. En los años 80, estudios de Giráldez et al. (1984, 1994) y González et al. (1991), ya indicaron la mejor acumulación de agua en suelos de la campiña andaluza en los sistemas de laboreo de conservación, tanto en cultivos extensivos como en olivar. En uno de los trabajos compara sistemas de laboreo en una rotación de girasol-leguminosa (garbanzo/habas)-trigo. Se destaca el efecto positivo de estos sistemas sobre la acumulación de agua que es más efectiva en los años secos. Esta mayor acumulación esta asociada con el mantenimiento de las grietas formadas en estos suelos y que al no labrar se conservan, permitiendo la conducción del agua hacia zonas profundas del suelo donde los sistemas de no laboreo almacenan más agua. Muriel et al. (1991) en la rotación leguminosa-cereal-girasol observaron también que las técnicas de mínimo laboreo proporcionan un mayor grado de disponibilidad de agua en suelos profundos y arcillosos.

Moreno et al., (1996) y Pelegrín et al. (1990) relacionan positivamente el laboreo de conservación con el uso eficiente del agua. En sus trabajos en un suelo Xerofluvent y bajo una rotación Girasol-Trigo, observaron la mayor acumulación de agua en los sistemas de laboreo de conservación sobre todo en el cultivo del girasol y en los años más secos. Por otro lado observaron también un desarrollo radicular superficial mayor en el sistema de laboreo de conservación.

Pastor, 1994; Pastor, 1996 trabajando el uso de cubiertas vegetales sembradas durante el período invernal, que generan un "mulching" de residuos durante el período veraniego de cultivo del olivo, observó una mayor conservación y disponibilidad del agua, sobre todo en años secos.

Arrúe y López (1991) y López et al., (1996) en diversas localidades en zonas de secano áridos y semiáridos del valle del Ebro en Aragón destacan que la acumulación del agua y el balance hídrico en cultivo de cebada es más favorable en sistemas de laboreo reducido, pero no en siembra directa. Las causas están en la mayor compactación que se produce en los sistemas de siembra directa en los primeros años y los bajos niveles de residuos conseguidos en estas zonas.

En estudios realizados por los autores de este capítulo durante los últimos quince años en localidades del Valle del Ebro oriental muestran que los sistemas de laboreo de conservación alcanzan contenidos hídricos ligeramente más elevados que los sistemas de laboreo convencional especialmente tras el periodo de recarga de agua del suelo (entre julio y diciembre para cultivos de invierno en climas mediterráneos). Este es el caso de Agramunt (Fig. 1), donde la mayor parte de los años la recarga mayor se produce en el sistema de No laboreo y la menor en el sistema de laboreo intensivo con arado de vertedera.

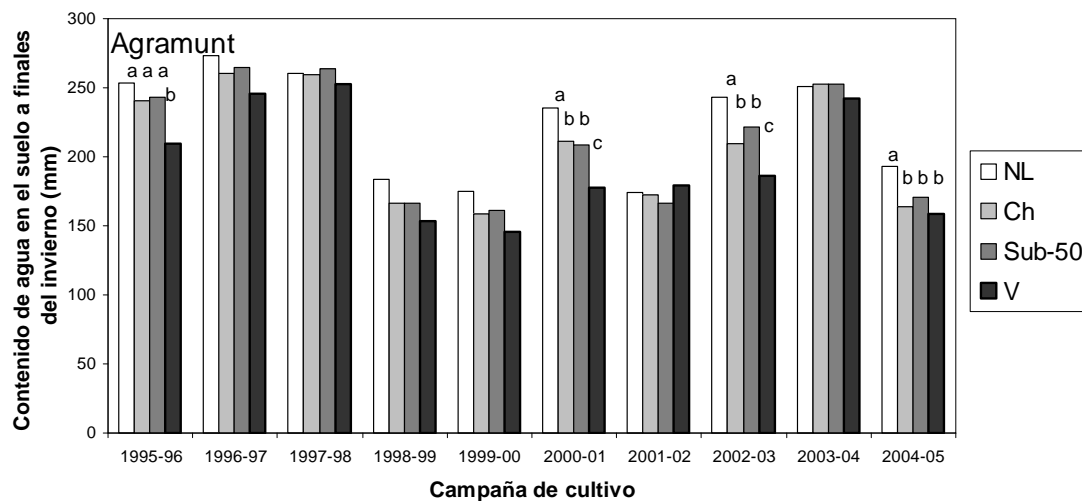


Fig. 1: Contenido de agua en el suelo en el ahijamiento en las distintas campañas de cultivo en Agramunt bajo diferentes sistemas de laboreo: No laboreo (NL), Chisel (Ch), Subsolado a 50 cm (Sub-50) y Vertedera (V). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$)

Es importante destacar que las mayores diferencias en agua acumulada se suelen producir en profundidad cuando la recarga es lo suficientemente importante (Fig. 2).

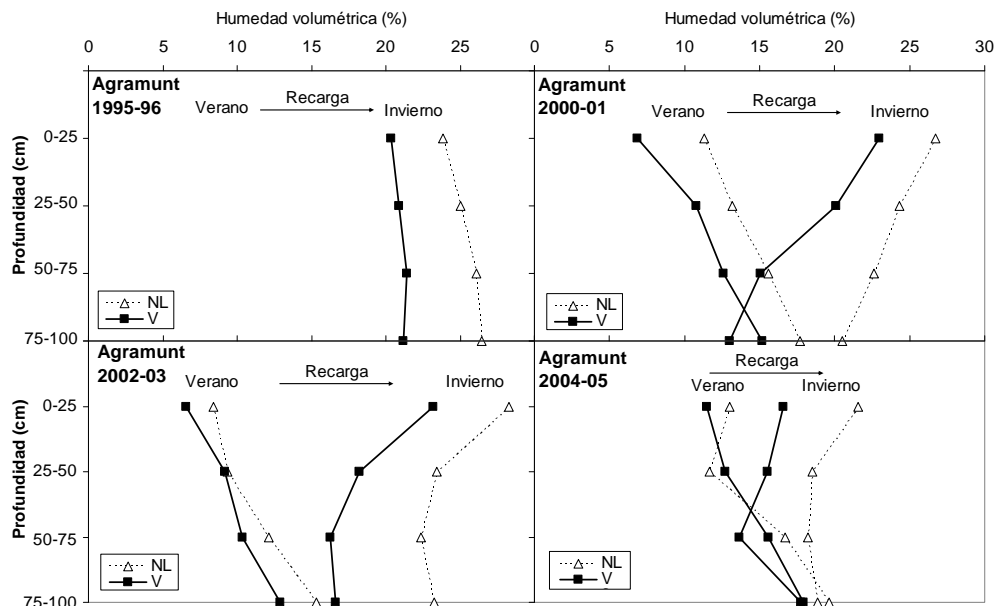


Fig. 2. Perfil de humedad en el suelo en verano y en invierno en Agramunt para las campañas de cultivo en que las diferencias de recarga entre No laboreo (NL) y Vertedera (V) son significativas. No hay datos disponibles del verano de la campaña 1995-96.

En los ensayos de secano de zonas áridas y semiáridas se aplica un balance hídrico simplificado considerando la precipitación como única entrada de agua al sistema y la evapotranspiración del cultivo como única salida. Se desprecian por tanto los efectos de la escorrentía superficial, el drenaje profundo y el ascenso capilar desde una eventual capa freática. Con estas premisas los procesos que regulan el resultado del balance son la infiltración (entrada del agua al suelo), la redistribución (movimiento del agua en el suelo) y la evapotranspiración (evaporación directa desde la superficie del suelo y transpiración a través de la planta)

La infiltración del agua en el suelo depende básicamente de las condiciones que se dan en su superficie. Así la presencia sobre el suelo de los residuos de la cosecha anterior protege los agregados del impacto directo de las gotas de lluvia evitando su disgregación y la formación posterior de una capa de suelo desestructurado que reduce drásticamente su capacidad de infiltración. La rugosidad de la superficie del suelo mejora la infiltración pues aumenta la superficie de contacto agua-suelo y permite la acumulación del agua en el microrelieve, ampliando el tiempo disponible para su infiltración. En los ensayos en la localidad de El Canós (Lampurlanés y Cantero-Martínez, 2006), se observó por un lado que el sistema de No laboreo es el que mantiene una mayor cantidad de residuos sobre el suelo (Fig. 3). Por otro lado, en los sistemas de laboreo convencional, aunque se incrementa mucho la rugosidad después de las labores primarias, decrece drásticamente con las labores secundarias.

Los residuos de la cosecha anterior contribuyen a reducir las pérdidas de agua por evaporación, lo que explicaría los mayores contenidos de humedad observados en las parcelas de siembra directa. Al reducirse la evaporación directa desde el suelo a la

atmósfera, aumenta el agua utilizada por el cultivo a través de transpiración lo que repercute en un mayor rendimiento.

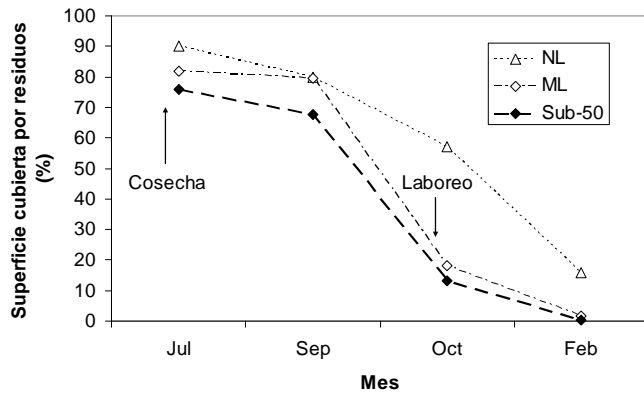


Fig. 3. Evolución de la superficie de suelo cubierta por residuos en El Canós bajo distintos sistemas de laboreo: No laboreo (NL), Mínimo laboreo (ML) y Subsulado a 50 cm (Sub-50). Datos de diversas campañas.

La redistribución del agua en el perfil del suelo está relacionada con la conductividad hidráulica del mismo. Aunque en superficie se han observado en ocasiones conductividades hidráulicas menores bajo siembra directa (Lampurlanés y Cantero-Martínez, 2006), no cabe duda que la continuidad de los canales naturales preservados en este sistema de laboreo ha propiciado los mayores contenidos de humedad registrados en profundidad.

El resultado de todos estos procesos se refleja en el balance hídrico durante el periodo de recarga (Fig. 4). Se observa que, en promedio, cuanto menor es la intensidad del laboreo, mayor es la recarga, especialmente desde la siembra hasta la salida del invierno y en las zonas más áridas, como ocurre en Agramunt (Cantero-Martínez et al., 2006).

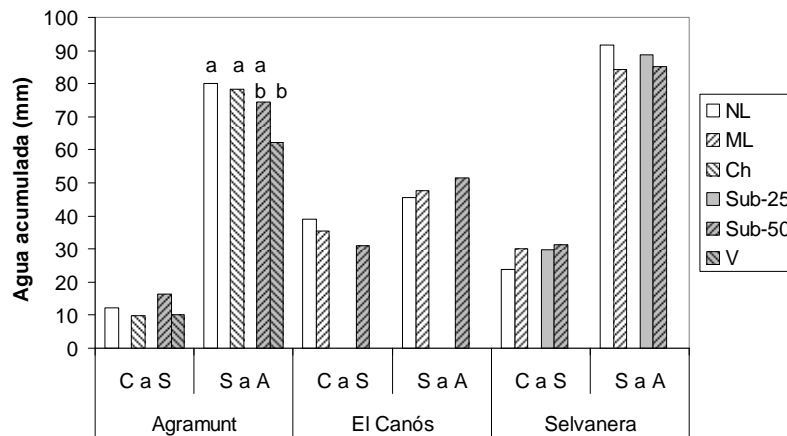


Fig. 4. Agua acumulada en el suelo en verano (de cosecha a siembra, C a S) y en otoño-invierno (de siembra a ahijamiento, S a A), en diferentes localidades, Agramunt (promedio de 10 años), El Canós (promedio de 8 años) y Selvanera (promedio de 10 años), bajo distintos sistemas de laboreo: No laboreo (NL), Mínimo laboreo (ML), Chisel (Ch), Subsulado a 25 cm (Sub-25), Subsulado a 50 cm (Sub-50) y Vertedera (V). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).

5. Manejo del Barbecho. Eficiencia de acumulación.

El barbecho ha sido una práctica habitual en los sistemas agrícolas áridos y semiáridos de secano mediterráneos (Cooper et al., 1987). Entre los diferentes aspectos ventajosos que justifican su utilización se encuentran la acumulación de agua durante el período de barbecho (Connor and Loomis, 1991). Aunque no está generalmente reconocida su ventaja sobre este punto, hay zonas donde la eficiencia de acumulación de agua en el período de barbecho se traduce en un rendimiento económico que justifica su utilización en las zonas mediterráneas (French, 1978; Cooke et al., 1985; López y Giráldez, 1996). Si bien esto último puede ser cierto en algunas circunstancias muy concretas no es lo habitual como demuestran muchos estudios en otras zonas del mundo. Por ello, French, (1978) define diversas condiciones que se deben dar para la utilización eficiente del barbecho. Entre ellas cita que el mantenimiento de la cubierta vegetal es imprescindible para la eficiencia del mismo.

Habitualmente el barbecho ha sido practicado en nuestras condiciones asociado a la quema de rastrojo y al laboreo intensivo y continuado para eliminar las malas hierbas y también en la creencia de la que se estimula la acumulación del agua en el suelo. De hecho y recientemente, en algunas de las medidas agroambientales y de control de tierras retiradas de la producción obligadas por la Política Agraria Comunitaria (PAC), se establecía que el barbecho tenía que ser obligatoriamente labrado. Esta regulación que todavía rige en algunas condiciones esta siendo reconsiderada en muchas otras. Así, se esta pensando la posibilidad del barbecho con cubierta vegetal y controlando las malas hierbas en base a aplicaciones limitadas de tratamientos herbicidas. Estas pautas de manejo son las que se proponen dentro de las técnicas de laboreo de conservación (en este caso no laboreo).

Para evaluar la efectividad de los mismos podemos referirnos a diferentes experiencias en nuestro país.

Así, Moret et al., (2007a) observaron, tras simular con el modelo SiSPAT (Braud et al., 1995) el balance de agua durante tres periodos de barbecho en un campo de secano semiárido del centro de Aragón y bajo el supuesto de que las propiedades hidráulicas del suelo no variaban a lo largo de los 16 -18 meses de barbecho, que en años con primavera muy lluviosa, el sistema de no laboreo presentaba menos pérdidas de agua por drenaje profundo (0-70 cm) y unas mayores pérdidas de agua del suelo por evaporación (Fig. 5). Este comportamiento puede ser explicado por la menor conductividad hidráulica (Fig. 6) y la mayor capacidad retención de agua en las capas superficiales del suelo (Fig. 7) observada en el sistema de no laboreo, que favorecen la evaporación del agua del suelo.

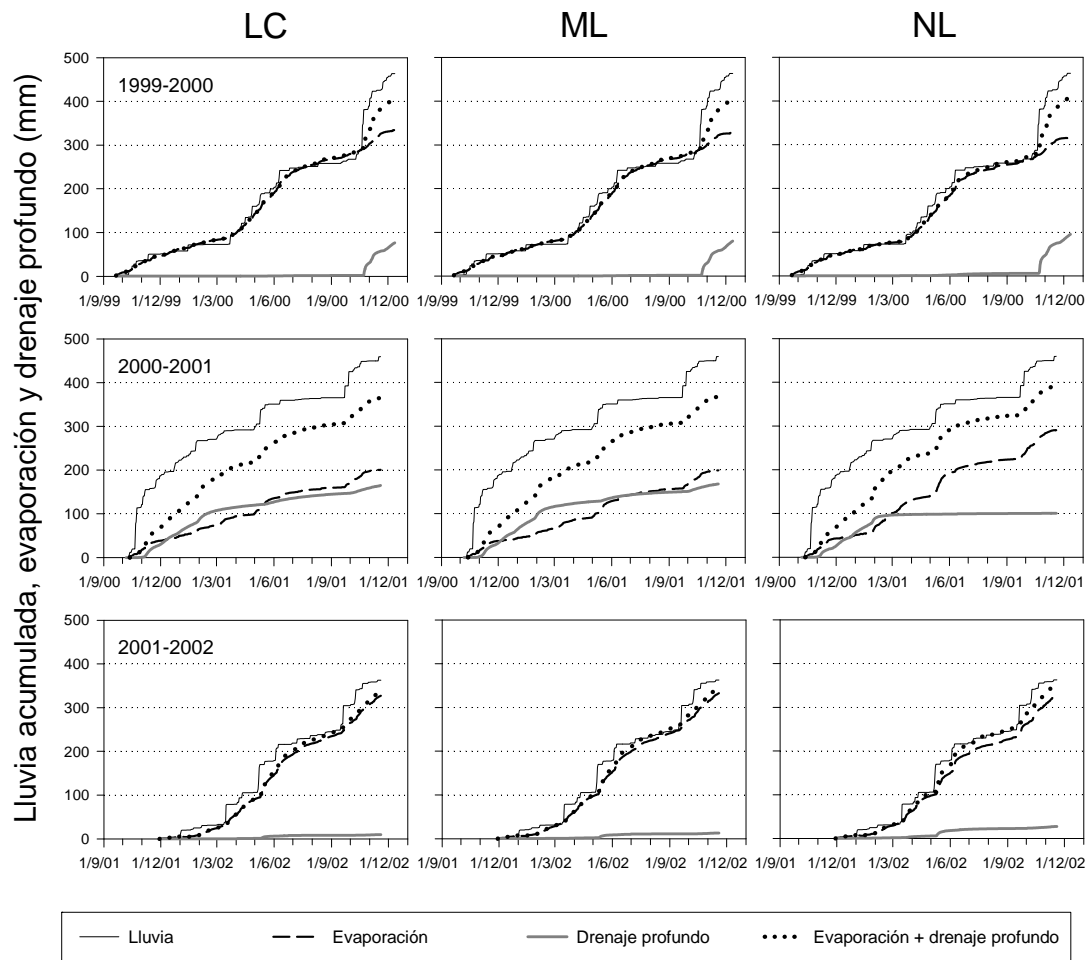


Fig. 5. Lluvia acumulada recibida durante los periodos de barbecho 1999-2000, 2000-2001 y 2001-2002 en el campo experimental de Peñaflores (Zaragoza) y pérdidas por evaporación y drenaje profundo del perfil del suelo (0-70 cm) simuladas por el modelo de simulación SiSPAT bajo laboreo convencional (LC), mínimo laboreo (ML) y no laboreo (NL).

Observaron también que la tasa de evaporación de agua en el suelo durante el periodo de barbecho largo (16-18 meses) varía a lo largo del mismo. Ésta, que es mínima durante el primer tercio del barbecho debido a la cobertura del suelo por residuos (López et al., 2003), la baja demanda evaporativa del periodo otoño-invierno y la presencia de la costra superficial del suelo que reduce la tasa de evaporación de agua del suelo, aumenta durante el segundo y tercer tercio del barbecho debido al incremento de la demanda evaporativa y al efecto de las labores (Moret et al., 2006). Las labores rompen la costra superficial, aumentan la porosidad y la conductividad hidráulica del suelo (Moret y Arrúe, 2007) y crean conductos de ventilación preferenciales que favorecen, a corto plazo, la evaporación del agua del suelo. Estas pérdidas son más acusadas cuanto mayor es la alteración del suelo.

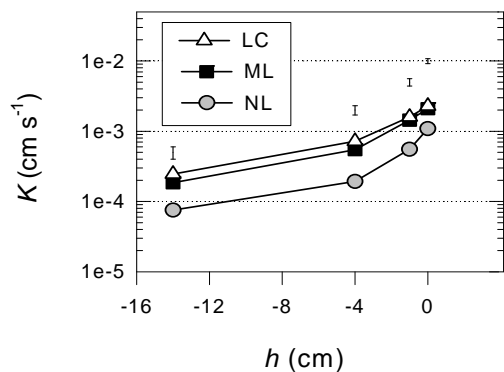


Fig. 6. Conductividad hidráulica, K, respecto al potencial mátrico del suelo, h, medida antes de las labores primarias durante un barbecho largo de 16-18 meses en un sistema de laboreo convencional (LC), mínimo laboreo (ML) y no laboreo (NL). Las barras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$) (Fuente: Moret y Arrúe, 2007)

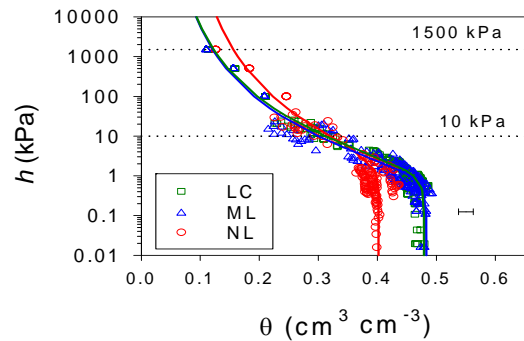


Fig. 7. Relación entre el contenido volumétrico de agua, θ , y el potencial mátrico del suelo, h, medida antes de las labores primarias durante un barbecho largo de 16-18 meses en un sistema de laboreo convencional (LC), mínimo laboreo (ML) y no laboreo (NL). Las barras indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$) (Fuente: Moret, 2004)

Así pues, Moret et al. (2006) observaron durante tres periodos de barbecho largo (16-18 meses), como el suelo bajo un sistema de laboreo intensivo con arado de vertedera, pierde por evaporación, las 24 h después de las labores primarias, entre 4 y 14 veces más agua que un sistema de mínimo laboreo con chisel y No Laboreo, respectivamente (Fig. 8a). Por el contrario, las labores secundarias, que actúan sobre los primeros 10 cm de la superficie del suelo y rompen la capilaridad superficial del mismo, producen unas menores pérdidas de agua del suelo por evaporación (Fig. 8b) y tienen un efecto beneficioso sobre la conservación del agua en el suelo a medio y largo plazo (Moret et al., 2006).

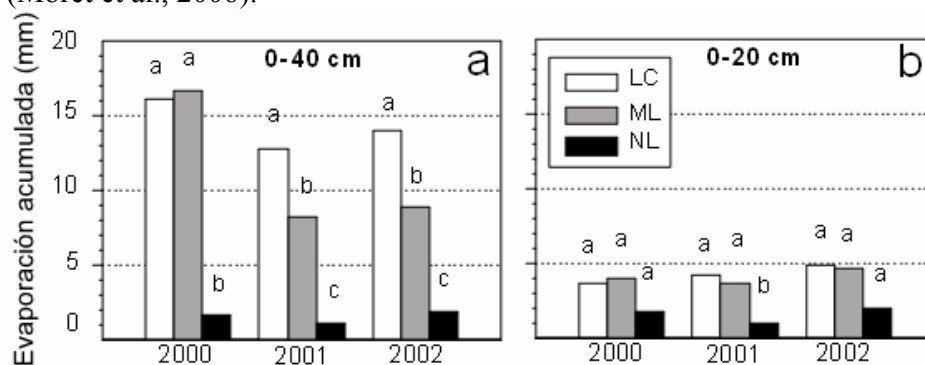


Fig. 8. Evaporación acumulada de agua del suelo medida 24 h tras las labores primarias (a) y secundarias (b) durante los periodos de barbecho 1999-2000, 2000-2001 y 2001-2002 en el campo experimental de Peñafior (Zaragoza) para un sistema de manejo de suelo de laboreo convencional (LC), mínimo laboreo (ML) y no laboreo (NL). Letras diferentes sobre las columnas indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$. (Fuente: Moret et al., 2006)

El efecto conjunto de las labores primarias y secundarias hace, sin embargo, que la evaporación de agua del suelo al final de un periodo de barbecho largo bajo un sistema de laboreo intensivo y mínimo laboreo sean similares a las observadas bajo un sistema de No laboreo (Moret et al., 2006). Esto implica que la eficiencia de almacenamiento de la precipitación en el suelo (EAP), al final de un periodo de barbecho largo sea similar entre los tres sistemas (López et al., 1996; Moret et al., 2006). Al analizar la evolución de la EAP en el suelo durante tres periodos de barbecho largo, Moret et al., (2006) observaron como este índice tiende a decrecer a lo largo del periodo de barbecho (Fig. 9).

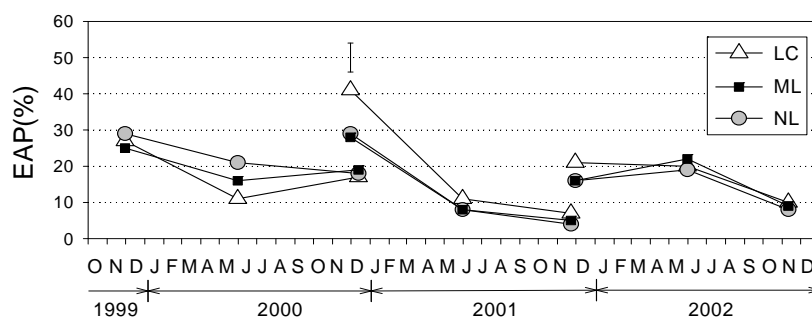


Fig. 9. Evolución de la eficiencia de almacenamiento de la precipitación en el suelo (EAP) durante los periodos de barbecho 1999-2000, 2000-2001 y 2001-2002 en el campo experimental de Peñaflores (Zaragoza) en un sistema de manejo de suelo de laboreo convencional (LC), mínimo laboreo (ML) y no laboreo (NL). Las barras representan diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ (Fuente: Moret et al., 2006)

En general, los máximos valores de EAP al final del barbecho se corresponden con aquellos periodos en los que se registra una precipitación más abundante en los dos últimos meses del barbecho, independientemente de la lluvia recogida a lo largo del mismo (Moret et al., 2006; Austin et al., 1998a). En general los periodos de barbecho de 16-18 meses presentan una deficiente EAP al final del barbecho oscilando entre el 8,7 y el 12 % (Austin et al., 1998a; Moret et al. 2006). Al analizar los componentes del balance de agua del suelo utilizando el modelo de simulación SiSPAT (Braud et al., 1995), Moret et al. (2007a) observaron como las labores primarias del suelo (vertedera y chisel) durante el periodo de barbecho largo tienen un efecto negativo o nulo sobre el almacenamiento de agua al final del periodo de barbecho.

Al comparar un sistema de cultivo continuo (CC) con uno de año y vez (CB), Moret et al. (2006) y López et al. (1996) observaron como, el sistema de CB almacena al final del periodo de barbecho entre 12 y 20 mm más agua que un sistema de CC, que incluyen un barbecho corto de 5 a 6 meses. Estos resultados indican que el sistema CB almacena en el suelo al final del periodo un 13% más agua que el sistema de CC (Moret et al., 2006).

El crecimiento del cultivo en las zonas semiáridas depende en gran medida de la distribución de la precipitación registrada a lo largo del periodo del desarrollo del cultivo. Moret et al. (2007b) observaron que, en los secanos semiáridos del centro de Aragón, la producción de biomasa está positivamente correlacionada tanto con el almacenamiento de agua en el suelo al final del periodo de barbecho como con las precipitaciones registradas durante el periodo de encañado del cultivo (Fig. 10). La distribución estacional de la lluvia tiene, sin embargo, un efecto muy diferente sobre el rendimiento en grano del cultivo. Así por ejemplo, en los secanos semiáridos de Peñafor (Zaragoza) el rendimiento obtenido durante la campaña 2001-2002 (Tabla 1), con una mayor disponibilidad de agua para el cultivo (ASDP) entre marzo y mayo (Fig. 10) debido a una abundante lluvia efectiva en esos meses (109 mm), fue aproximadamente el doble al obtenido en la campaña 2000-2001, caracterizada por una alta disponibilidad de agua en el momento de siembra, pero una reducida ASDP en los momentos de diferenciación florar, debido a las escasas precipitaciones (56 mm) registradas entre los meses de marzo y mayo.

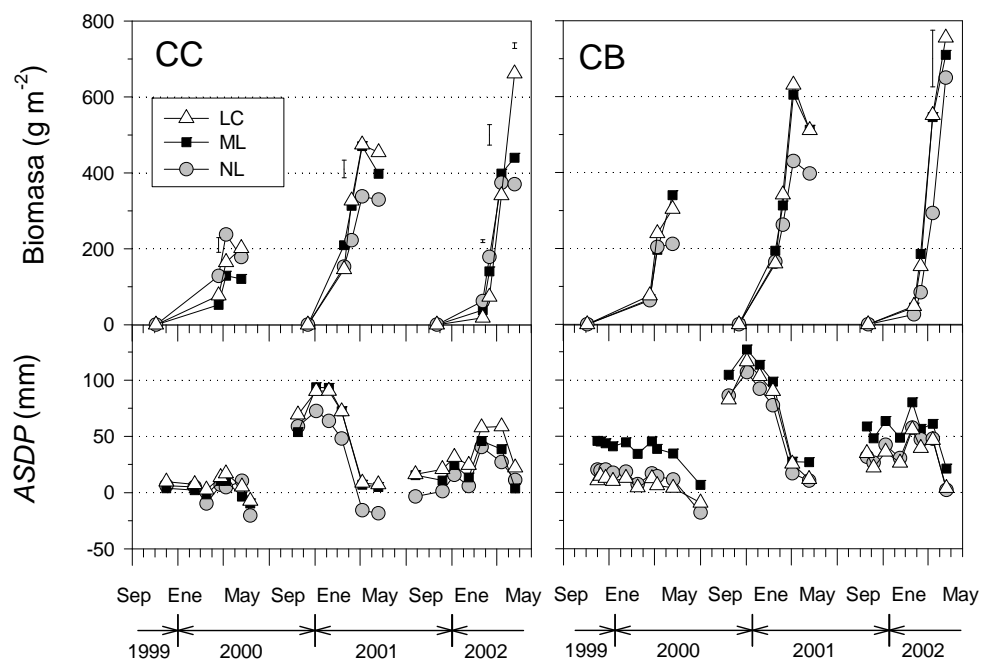


Fig. 10. Evolución de la biomasa aérea del cultivo y agua del suelo disponible para la planta (ASDP) (0-70 cm) afectado por el sistema de laboreo (LC, laboreo convencional; ML, mínimo laboreo; NL, no laboreo) bajo un sistema de cultivo continuo (CC) y cultivo de año y vez (CB) durante las campañas 1999-2000, 2000-2001 y 2001-2002 en los campos de ensayo de Peñaflor (Zaragoza) (Fuente, Moret et al., 2007b).

Tabla 1. Precipitación registrada durante el periodo de cultivo, rendimiento e índice de cosecha del cultivo afectado por el sistema de laboreo (LC; laboreo convencional; ML, mínimo laboreo; NL, no laboreo) y sistema de cultivo (CC, cultivo continuo; CB, sistema de año y vez) en las campañas 1991-1992, 1999-2000, 2000-2001 y 2001-2002 en tres localidades diferentes del centro de Aragón

Campaña de cultivo	Localidad	Precipitación durante el periodo de cultivo (mm)	Sistema de cultivo	Sistema de laboreo	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Índice de cosecha	
1991-1992 ¹	Zuera	246	CC	LC	440a [†]	0.36	
				ML	390a	0.36	
				NL	420 ^a	0.35	
	Híjar	268	CC	LC	970a	0.46	
				ML	850a	0.44	
				NL	360b	0.33	
			CB	LC	1370a	0.45	
				ML	1260a	0.47	
				NL	130b	0.23	
1999-2000 ²	Peñaflor	205	CC	LC	859a	0.43	
				ML	457c	0.36	
				NL	633b	0.35	
				CB	LC	1442a	0.50
					ML	1693a	0.49
					NL	839a	0.36
2000-2001 ²	Peñaflor	164	CC	LC	1409a	0.28	
				ML	1188a	0.28	
				NL	902a	0.27	
				CB	LC	1475a	0.25
					ML	1347a	0.24
					NL	1242a	0.26
2001-2002 ²	Peñaflor	216	CC	LC	2599a	0.39	
				ML	1782a	0.39	
				NL	1386a	0.32	
				CB	LC	3096a	0.40
					ML	3021a	0.43
					NL	3578a	0.56

[†] Letras diferentes dentro de una misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos $p < 0,05$.

En estos estudios se observa también, aunque no de forma generalizada que el sistema de No laboreo debido a la menos cantidad de agua acumulada produce algunos años menor que los sistemas de mínimo laboreo y laboreo intensivo con arado de vertedera.

En un experimento llevado a cabo durante 4 años en El Canós en la zona oriental del Valle del Ebro se compararon el barbecho químico con el tradicional en dos suelos de distinta profundidad (Lampurlanés, et al., 2002). En este estudio se diferenciaron dos

períodos de recarga en el barbecho: un primer periodo coincidiendo con las lluvias de otoño y otro durante las lluvias de primavera. Aunque durante el primer periodo la eficiencia media de acumulación de agua se podría situar en torno al 30 % (alcanzando algún año hasta el 50 %), durante el segundo periodo fue muy baja y en algunos años negativa lo que indica pérdidas de agua por evaporación en lugar de recarga del perfil. El resultado global fue una baja eficiencia de acumulación de agua en el conjunto del periodo de barbecho, de un 10 %. Comparando la cantidad de agua en el perfil del suelo tras el barbecho con la encontrada en parcelas en las que no se practicaba el barbecho, aunque aparecieron diferencias, no fueron siempre a favor del barbecho, por lo que en promedio no fueron significativas. En este caso tanto tras barbecho como en cultivo continuado si parece haber una mayor acumulación significativa en la acumulación de agua bajo los sistemas de laboreo mínimo y no laboreo.

6. Rendimiento y eficiencia de Uso del Agua.

No hay un consenso generalizado en los efectos del sistema de laboreo sobre el rendimiento del cultivo a nivel general. Aun así, y teniendo en cuenta el factor agua como limitante y las condiciones mediterráneas de secano, parece haber bastante unanimidad en los pocos estudios obtenidos en toda la cuenca Mediterránea (Cantero-Martínez y Gabiña, 2004; Arrúe et al. 2007), que el rendimiento y la eficiencia de uso del agua son mejores en los sistemas de laboreo de conservación en estas condiciones y sobre todo en los años secos.

Sin embargo hay condiciones en las que el sistema de No laboreo pueden ser menos efectivo, como muestran los estudios López y Arrúe (1997) y Moret et al. (2007b), donde el sistema de NL tiene una producción en biomasa inferior y entre un 8 y 53% menos grano que los sistemas de laboreo intensivo y mínimo laboreo. Estas diferencias pueden atribuirse al efecto de la compactación del suelo bajo un sistema de No laboreo que influye negativamente sobre el crecimiento del sistema radicular. Esta menor producción de biomasa produce menos residuos y una menor cobertura del suelo por parte del cultivo, lo que favorece la evaporación del agua en el suelo y por lo tanto, tal como muestra la Fig. 10, reduce la cantidad de agua disponible para el cultivo. Aunque en general el sistema de laboreo no afecta significativamente a la eficiencia de uso del agua grano (EUA_g), el sistema de No laboreo tiende a mostrar los menores valores de EUA_g , debido probablemente a las mayores pérdidas de agua del suelo por evaporación observadas bajo este tratamiento.

En los estudios de la localidad de El Canos en la zona oriental del Valle del Ebro (Lampurlanés, et al., 2002) se constata, que tras el barbecho hay un pequeño incremento del rendimiento, si se compara con el cultivo continuado, que sin embargo no compensa de ningún modo el año improductivo. Dado que, en cuanto acumulación de agua, el sistema de barbecho no representa ninguna ventaja debemos pensar que otros beneficios del barbecho (mejora del estado nutritivo del suelo, reducción de la flora arvense, reducción de la incidencia de plagas y enfermedades) son los que provocan este incremento de rendimiento. Los efectos del sistema de laboreo sobre el rendimiento y crecimiento son moderados y los incrementos tanto en no cultivo anual y tras al barbecho son de un 5 % en los años más secos.

En otras condiciones ligeramente menos áridas y en los ensayos a largo plazo realizados en zonas de distinto grado de aridez (Cantero-Martínez et al., 2007) se observaron pocas diferencias entre los distintos sistemas de laboreo en cuanto al consumo de agua por los cultivos. En cambio sí aparecieron diferencias en rendimiento, a favor de los sistemas de laboreo de conservación, especialmente en Agramunt (Fig. 11), la localidad más árida.

La obtención de un mayor rendimiento con un consumo de agua similar resultó en valores de eficiencia del uso del agua significativamente más elevados en siembra directa en esta localidad (Fig. 12). Esto demuestra la potencialidad de los sistemas de laboreo reducido para incrementar la eficiencia del uso del agua, especialmente en los ambientes más áridos. También Moreno et al., (1996) y Pelegrín et al. (1990) observaron mejoras en la eficiencia de uso del agua, sobre todo en el cultivo del girasol.

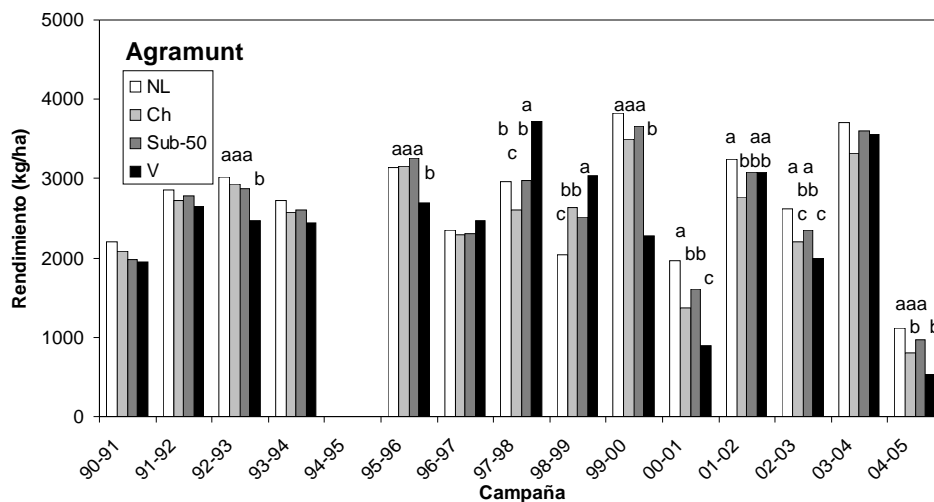


Fig. 11. Rendimiento de cebada en Agramunt bajo distintos sistemas de laboreo: No laboreo (NL), Chisel (Ch), Subsolado a 50 cm (Sub-50) y Vertedera (V). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).

La mayor eficiencia de uso del agua es debido a que el agua acumulada en profundidad es preservada de las pérdidas por evaporación directa. En cambio, está disponible para la planta, que es capaz de hacer crecer su sistema radicular allí donde hay agua para extraerla, especialmente en el sistema de no laboreo. Así se observó en El Canós en el muestreo de floración (Fig. 13), en el que la densidad de longitud radicular (LV, cm de raíz por cm^3 de suelo) fue mayor en el sistema de No laboreo allí donde era mayor el contenido de humedad: en superficie y en profundidad (Lampurlanés et al., 2001). La mayor densidad aparente y resistencia a la penetración encontrados bajo No laboreo no limitaron el crecimiento radicular (Lampurlanés y Cantero-Martínez, 2003) probablemente debido a la preservación de los espacios entre agregados del suelo.

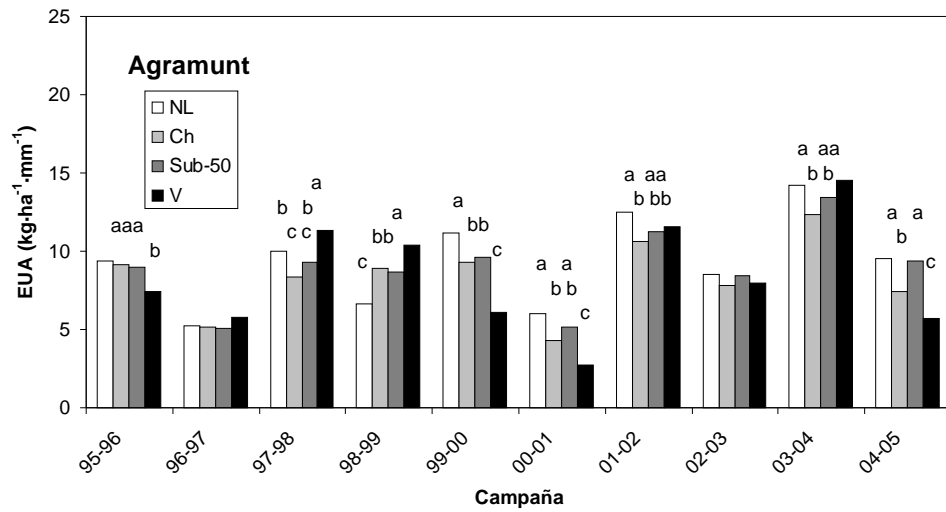


Fig. 12. Eficiencia en el uso del agua (EUA) de la cebada en Agramunt bajo distintos sistemas de laboreo: No laboreo (NL), Chisel (Ch), Subsulado a 50 cm (Sub-50) y Vertedera (V). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$).

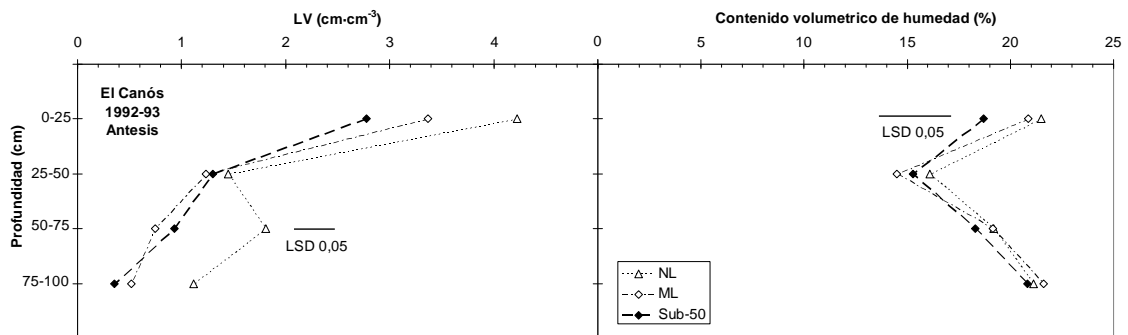


Fig. 13. Distribución en profundidad de la densidad de longitud radicular (LV) y del contenido volumétrico de humedad en El Canós durante el periodo de antesis de la campaña 1992-93 para diferentes sistemas de laboreo: No laboreo (NL), Mínimo laboreo (ML) y Subsulado a 50 cm (Sub-50).

Otra causa de la mejor eficiencia de uso del agua es el reparto del agua consumida por el cultivo antes y después de floración. Así los sistemas de laboreo de conservación, que tienen mejor distribución del agua en el suelo, también ajustan mejor la disponibilidad y consumo, sobre todo el periodo tras la floración (llenado del grano), lo cual mejora el rendimiento por unidad de agua utilizada (Cantero-Martínez et al., 2007)

7. Conclusiones y recomendaciones

Las técnicas de laboreo de conservación (Agricultura de Conservación) son muy adecuadas y probablemente la mejor opción para conseguir la sostenibilidad en los sistemas agrícolas de secano mediterráneos. Su base se fundamenta en que mejoran la captación y la conservación del agua en el suelo y favorecen la eficiencia de utilización del agua por el cultivo que es la estrategia básica en estas zonas donde el agua es el factor principal de la producción de los cultivos.

Según nos muestran los ejemplos ilustrados en este capítulo, hay que determinar en cada caso cual de las variantes entre las técnicas de laboreo mínimo o no laboreo deben ser utilizados. La consecución y el mantenimiento de una cubierta vegetal en base al residuo de la cosecha (paja y rastrojo) son de vital importancia para obtener las ventajas pretendidas. En el barbecho que es una práctica generalmente ineficiente para la acumulación del agua en nuestras condiciones, es donde probablemente la existencia de este residuo tenga todavía una importancia más crítica. En caso de utilizar la práctica del mismo, el barbecho químico es mejor opción convirtiendo la cubierta de malas hierbas potencialmente negativa para el cultivo posterior en un aliado para la protección del suelo y una mejor conservación del agua.

8. Referencias.

- Arrúe JL, López MV. (1991). Laboreo de conservación. Tendencias y prioridades de investigación. *Suelo y Planta*, 1:555-564.
- Arrúe JL., Cantero-Martínez C., Cardarelli A., Kavvadias V., López MV., Moreno F., Mrabet R., Murillo JM., Pérez de Ciriza JJ., Sombrero A., Tenorio JL., Zambrana E., 2007. Comprehensive inventory and assessment of existing knowledge on sustainable agriculture in the Mediterranean platform of KASSA. KASSA project (Knowledge Assessment and Sharing on Sustainable Agriculture) a European Commission – funded project (DG-Research - Contract no. GOCE-CT-2004-505582). (In Press). <http://kassa.cirad.fr>
- Austin, R.B., Playán, E., Gimeno, J., 1998a. Water storage in soils during the fallow: prediction of the effects of rainfall pattern and soil conditions in the Ebro valley of Spain. *Agric. Water Manag.* 8, 239-248.
- Blevins, R.L., Frye, W.W., 1993. Conservation tillage: an ecological approach to soil management. *Adv. Agron.* 51, 33-78.
- Braud, I., Dantas-Antonino, A.C., Vauclin, M., Thony, J.L., Ruelle, P., 1995. A simple soil-plant-atmosphere transfer model (SiSPAT) development and field verification. *J. Hydrol.* 166, 213-250.
- Cantero-Martínez C., Gabiña D. (Eds.) 2004. Mediterranean Rainfed Agriculture: Strategies for Sustainability. *Options Méditerranéennes, Serie A, No. 60*, 335 pp. (ISBN 2-85352-294-6).
- Cantero-Martínez, C., Angás, P., Lampurlanés, J., 2006. Water conservation under conservation tillage in Mediterranean rainfed conditions. *Proceedings of the International ESSC conference on Soil and Water Conservations under Changing Land Use. September 12-15. Lleida (Spain).*

- Cantero-Martínez, C., Angás, P., Lampurlanés, J., 2007. Long-term yield and water use efficiency under various tillage systems in Mediterranean rainfed conditions. *Annals of Applied Biology*. (In press)
- Connor, D.J., Loomis, R.S., 1991. Strategies and tactics for water-limited agriculture in low rainfall Mediterranean climates. In: Acevedo, E., Fereres, E., Giménez, C. and Srivastava, J.P. (Eds.), *Improvement and management of winter cereals under temperature, drought and salinity stresses*. Proceedings of the ICARDA-INIA Symposium, 26-29 October 1987, Córdoba. MAPA-INIA, Madrid, Spain, pp. 441-465.
- Cooke, J.K., Ford, G.W., Dumsday R.G., Willatt, S.T., 1985. Effect of fallowing practices on the growth and yield of wheat in south-eastern Australia. *Aust. J. Exp. Agric.* 25, 614-627.
- Cooper PJM., Gregory PJ., Tully., Harris HC. 1987. Improving water use efficiency of annual crops in the rainfed farming systems of West Asia and North Africa. *Expl. Agric.*, 23:113-158.
- French, R.J., 1978. The effect of fallowing on the yield of wheat. I. The effect on soil water storage and nitrate supply. *Aust. J. Agric. Res.* 29, 653-668.
- Giráldez JV., Fereres E., García M., Gil J., González P., Aguera J. (1984). Laboreo mínimo y siembra directa en los suelos arcillosos de la campiña andaluza. II Jornadas técnicas sobre cereales de invierno. vol. 1: 77-91. ITGC. Pamplona.
- Giráldez JV, González P. 1994. No-Tillage in clay soils under Mediterranean climate: Physical aspects. In *Experience with the applicability of No-Tillage crop production in the west-european countries*. EC-Workshop I 111-117. Giessen.
- González P., Fereres E., Giráldez JV., González de Quevedo MI, Laguna A. 1991. El laboreo de conservación como medida de control de la erosión. *Suelo y Planta*, 1:545-554.
- Lal, R., 1989. Conservation tillage for sustainable agriculture: tropics versus temperate environments. *Adv. Agron.* 42, 85-197.
- Lampurlanés, J., Angás, P., Cantero-Martínez, C., 2001. Root growth, soil water content and yield of barley under different tillage systems on two soils in semiarid conditions. *Field Crops Research*. 69, 27-40.
- Lampurlanés, J., Angás, P., Cantero-Martínez, C., 2002. Tillage effects on water storage during fallow, and on barley root growth and yield in two contrasting soils of the semi-arid Segarra region in Spain. *Soil and Tillage Research*. 65, 207-220.
- Lampurlanés, J. y Cantero-Martínez, C., 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. *Agronomy Journal*. 95, 526-536.
- Lampurlanés, J. y Cantero-Martínez, C., 2006. Hydraulic conductivity, residue cover and soil surface roughness under different tillage systems in semiarid conditions. *Soil and Tillage Research*. 85, 13-26.
- López, M.V., Arrúe, J.L., 1997. Growth, yield and water use efficiency of winter barley in response to conservation tillage in a semi-arid region of Spain. *Soil Till. Res.* 44, 35-54.
- López, M.V., Arrúe, J.L., Sánchez-Girón, V., 1996. A comparison between seasonal changes in soil water storage and penetration resistance under conventional and conservation tillage systems in Aragon. *Soil Till. Res.* 37, 251-271.
- López, J.J., Giráldez, J.V., 1996. ¿Es el barbecho necesario? Analisis de la eficiencia del barbecho mediante un modelo de la evolución de la humedad del suelo. *Invest. Agr.: Prod. Prot. Veg.* 7, 327-343.
- López, M.V., Moret, D., Gracia, R. and Arrúe, J.L., 2003. Tillage effects on barley residue cover during fallow in semiarid Aragon. *Soil Till. Res.* 72, 53-64.
- McCalla, T.M., Army, T.J., 1961. Stubble mulch farming. *Adv. Agron.* 13, 125-196.
- Moreno F, Pelegrín P., Fernández JE., Murillo JM. 1996. Soil physical properties, water depletion and crop development under traditional and conservation tillage in southern Spain. *Soil and Tillage Research*, 41:25-42.

- Moret, D. 2004. Efectos del laboreo sobre las propiedades hidrofísicas y balance hídrico del suelo durante el periodo de barbecho de una rotación cebada-barbecho en condiciones de secano semiárido del centro de Aragón. Tesis Doctoral. Universidad de Lleida.
- Moret, D., Arrúe, J.L. 2007. Dynamics of soil bulk properties during fallow as affected by tillage. *Soil and Tillage Research* (en prensa).
- Moret, D., Arrúe, J.L., López M.V., Gracia, R., 2006. Influence of fallowing practices on soil water and precipitation storage efficiency in semiarid Aragon, (NE Spain). *Agric. Water Manage.* 82, 161-176.
- Moret, D., Braud, I., Arrúe, J.L. 2007a. Water Balance Simulation of a Dryland Soil during Fallow under Conventional and Conservation Tillage in Semiarid Aragon, Northeast Spain. *Soil Till. Res.* 92, 251-263.
- Moret, D., Arrúe, J.L., López M.V., Gracia, R. 2007b. Winter barley performance under different cropping and tillage systems in semiarid Aragon (NE Spain). *Eur. J. Agron.* 26, 54-63.
- Muriel J.L., Del Toro M., García AM. 1991. Influencia del tipo de laboreo en la disponibilidad de agua de distintos suelos en la campiña andaluza. *Proc. XVIII Reunión Nacional de suelos.* La Laguna.
- Pastor M. (1994). Sistemas de manejo del suelo en olivicultura. *Fruticultura*, 62:41-52.
- Pastor M. (1996). La Erosión y el olivar. AELC/SV. Ficha técnica nº2. Córdoba.
- Pelegrín P, Moreno F, Martín-Aranda J., Camps M. 1990. The influence of tillage methods on soil physical properties and water balance for a typical crop rotation in SW Spain. *Soil and Tillage Research*, 16:345-358.
- Unger, P.W., McCalla, R.M., 1980. Conservation tillage systems. *Adv. in Agron.* 33, 1-58.