



EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA EN LAS ROTACIONES DE CULTIVO SEGÚN EL SISTEMA DE LABOREO



Doctorando: Purificación Fernández García
Director: Prof. Luis López Bellido

2015

TITULO: *Eficiencia del uso del agua en las rotaciones de cultivo según el sistema de laboreo.*

AUTOR: *María Purificación Fernández García*

© Edita: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 2016
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

www.uco.es/publicaciones
publicaciones@uco.es

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AGRONÓMICA Y
DE MONTES



TESIS DOCTORAL

**EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA EN LAS
ROTACIONES DE CULTIVO SEGÚN EL SISTEMA
DE LABOREO.**

Doctorando: Purificación Fernández García
Director: Prof. Luis López Bellido

NOVIEMBRE 2015



TÍTULO DE LA TESIS:

**EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA EN LAS ROTACIONES DE CULTIVO
SEGÚN EL SISTEMA DE LABOREO**

DOCTORANDO/A:

Purificación Fernández García

INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS

(se hará mención a la evolución y desarrollo de la tesis, así como a trabajos y publicaciones derivados de la misma).

Esta tesis doctoral ha sido realizada dentro de un experimento de larga duración denominado "Malagón" en las condiciones de clima mediterráneo de seco. El objetivo ha sido estudiar el contenido de agua en el suelo en siembra y cosecha, rendimiento y sus componentes de rendimiento de los cultivos de garbanzos, habas y girasol; así como la determinación de los índices del agua: eficiencia en el uso de la precipitación, uso del agua y eficiencia en el uso del agua.

El estudio ha sido novedoso y de gran relevancia, ya que reúne información a lo largo de un periodo de diez años, de dos sistemas de laboreo (no laboreo y laboreo convencional) y cuatro dosis de N fertilizante (0, 50, 100 y 150 kg N ha⁻¹) aplicado al cultivo de trigo precedente, en similitud con lo que practican los agricultores de la zona.

Este trabajo ha dado lugar a una publicación en una revista de impacto del primer cuartil de la base de datos ISI Thomson Reuters.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, 30 de Noviembre de 2015

Firma del/de los director/es

Fdo.: Luis López Bellido

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda de las siguientes personas:

El profesor D. Luis López Bellido, por transmitir sus conocimientos, paciencia y cariño en todos estos años.

El profesor D. Rafael López-Bellido Garrido, por aportar sus ideas creativas cuando más se necesitaba.

La Doctora Verónica Muñoz Romero, no sólo por su aportación científica sino por haber encontrado en ella una verdadera amiga durante estos años.

D. Joaquín Muñoz y D. José Muñoz, por su ayuda en las tareas de campo y su tesón para poder concluir este trabajo.

D^a. Auxiliadora López-Bellido Garrido, por su ayuda en lo profesional y en lo personal.

Y finalmente y no menos importante, mi familia, a Fran por todo el apoyo y cariño recibido en toda esta travesía, a Irene por su ayuda y consejos y por último a mis padres, por sus consejos y su apoyo, aunque alguno de ellos haya sido recibido desde la distancia del tiempo.

RESUMEN

En condiciones de secano mediterráneas, la producción de garbanzos, habas y girasol se puede aumentar mediante la mejora del contenido de agua del suelo (SWC). El estudio ha tenido lugar dentro del marco del experimento de larga duración denominado “Malagón” iniciado en 1986, situado en la campiña del Guadalquivir (Córdoba), en un suelo Vertisol (Typic Haploxererts) típico de la zona mediterránea. Estos Vertisoles se caracterizan por un elevado contenido de arcilla, bajo contenido de materia orgánica y alta capacidad de intercambio catiónico. El estudio se ha llevado a cabo en el periodo 2000-2009. Se utilizó un diseño experimental en parcelas sub-subdivididas con cuatro repeticiones siendo la parcela principal el sistema de laboreo (laboreo convencional (LC) y no laboreo (NL); las subparcelas la rotación de cultivos bianual: trigo (*Triticum aestivum* L.)-girasol (*Helianthus annuus* L.), trigo-garbanzo (*Cicer arietinum* L.), trigo-habas (*Vicia faba* L.) y la sub-subparcela la dosis de nitrógeno fertilizante aplicado al trigo (0, 50, 100, y 150 Kg N ha⁻¹).

Las determinaciones y medidas en los cultivos de garbanzo, girasol y habas han sido: el contenido de agua en el suelo hasta una profundidad de 90 cm en intervalos de 30 cm, tanto en siembra como en cosecha, el rendimiento de grano y los componentes de rendimiento de los cultivos. Se calcularon los siguientes índices: la eficiencia en el uso de la precipitación (PUE), el uso del agua (WU) y la eficiencia en el uso del agua (WUE), todos estos índices se expresaron en kg ha⁻¹ mm⁻¹ a excepción del WU que se midió en mm.

Las diferencias de precipitación entre años influyeron en todas las medidas y coeficientes estudiados. El contenido de agua en el suelo en siembra fue mayor en el NL que en el LC en el perfil 0-30 cm de los tres cultivos estudiados (garbanzo, habas y girasol) siendo sus valores de 38.4×10^{-2} , 37.8×10^{-2} y 38.2×10^{-2} m³ m⁻³ en el NL frente a 36.1×10^{-2} , 36.1×10^{-2} y 36.2×10^{-2} m³ m⁻³ en el LC,

respectivamente. El NL mejoró las condiciones del lecho de siembra frente al LC. El NL mejoró el rendimiento de grano respecto al LC en los cultivos de garbanzo y habas pero no sucedió lo mismo en el rendimiento de girasol. El uso del agua (WU) fue mayor en el NL que en el LC en los cultivos de garbanzo y habas siendo sus valores de 375 y 442 mm frente a 355 y 429 mm, respectivamente. En el cultivo de las habas, el NL mejoró la PUE y la WUE respecto al LC, con un papel más importante en los años secos, sin embargo en el cultivo del girasol, el LC mejoró al NL en la PUE y en la WUE, relacionándose esta mejora con una mayor infiltración del agua producida por el mayor tamaño de las grietas del LC en el suelo.

Las diferentes dosis de N fertilizante aplicadas al cultivo de trigo precedente tuvieron poca influencia dentro de los cultivos estudiados; en las leguminosas por el papel de estas en la fijación simbiótica del nitrógeno y en el girasol por las bajas precipitaciones recibidas en el ciclo del cultivo, que dan lugar a que las dosis de N fertilizante tengan poca influencia en los índices estudiados.

SUMMARY

Under rainfed Mediterranean conditions, chickpeas, faba beans and sunflower production can be increased by improving the soil water content (SWC). The study was conducted within the framework of a long-term experiment called “Malagon”, which began in 1986. The study area was located in Cordoba, southern Spain, on a Vertisol soil (TypicHaploxerts) typical of the Mediterranean region, where rainfed cropping is the standard practice. The Vertisol is characterized by a high clay content, low organic matter content and high cation exchange capacity. The study was performed over a period of ten years (2000-2009) and designed considering a randomized complete block with a split split plot arrangement and four blocks. Main plots were tillage systems, conventional tillage (CT) and no tillage (NT), subplots were crop rotation with three 2-year rotations (wheat (*Triticum aestivum* L.)-sunflower (*Helianthus annuus* L.), wheat-chickpea (*Cicer arietinum* L.) and wheat-faba bean (*Vicia faba* L.) and sub-subplot was N fertilizer rate (0, 50, 100 and 150 kg N ha⁻¹) applied to wheat.

The data collected were the soil water content, recorded before sowing and after harvesting, in 30 cm increments up to 90 cm, the grain yield and the yield components, for chickpea, faba bean and sunflower. The precipitation use efficiency (PUE), water use (WU) and the water use efficiency (WUE) were calculated and expressed in kg ha⁻¹ mm⁻¹ but WU, which was measured in mm.

Highly significant differences were detected in all measures and ratios studied due to the large variation in rainfall between years. The soil water content at sowing was higher under NT treatment than under the CT treatment in the 0-30 cm soil layer for the three crops studied (chickpea, faba bean and sunflower) which improved seedbed conditions. The values of the NT treatment were 38.4×10^{-2} , 37.8×10^{-2} and $38.2 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ for the chickpea, faba bean and sunflower crops and the values of the CT treatment were 36.1×10^{-2} , 36.1×10^{-2} and $36.2 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectively. The NT treatment achieved a higher grain yield than the CT

treatment in the chickpea and faba bean crops but the sunflower crop was not show significant differences. The WU was higher under the NT treatment than under the CT treatment in the chickpea and faba bean crops, with values of 442 and 375mm and 355 and 429 mm, respectively. In the faba bean crop, NT treatment improved PUE and WUE respect to CT treatment. The NT treatment in these parameters was more important in dry years although in the sunflower crop PUE and WUE were higher under the CT treatment due to the increased water infiltration through the larger cracks caused by CT.

The different rates of N fertilizer applied to previous crop had little influence on the crops studied in legumes due to their role in the symbiotic nitrogen fixation and in sunflower because of low rainfall during the growing season, reducing the effects of N fertilizer on the ratios studied.

INDICE GENERAL

RESUMEN	vii
SUMMARY	ix
ÍNDICE GENERAL	1
ÍNDICE DE FIGURAS	4
ÍNDICE DE TABLAS	7
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO	12
1.1.1. EFECTO DEL SISTEMA DE LABOREO SOBRE EL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO	13
1.2. INFLUENCIA DEL SISTEMA DE LABOREO SOBRE EL CONTENIDO DE NITRÓGENO EN EL SUELO	17
1.3. ROTACIONES DE CULTIVO	18
1.3.1. EL EFECTO DE LAS LEGUMINOSAS EN EL NITRÓGENO DEL SUELO	22
1.4. RENDIMIENTO DE GRANO Y COMPONENTES DE RENDIMIENTO	24
1.5. EFICIENCIA EN EL USO DE LA PRECIPITACIÓN Y EN EL ALMACENAMIENTO DEL AGUA	27
2. OBJETIVOS	31
3. MATERIAL Y MÉTODOS	35
3.1. LOCALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO	35
3.1.1. CLIMA	35
3.1.2. CARACTERIZACIÓN DEL SUELO	36
3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL	37
3.3. TÉCNICAS Y MATERIAL UTILIZADO	37
3.4. DETERMINACIONES Y ANÁLISIS	39
3.4.1. CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO	39
3.4.2. RENDIMIENTO DE GRANO Y COMPONENTES DE RENDIMIENTO DE CADA CULTIVO	39
3.4.2.1. Rendimiento de grano	39
3.4.2.2. Componentes de rendimiento	40
Número de granos vaina ⁻¹ y número de vainas m ⁻²	40

Número de granos capítulo ⁻¹ y número de capítulos m ⁻²	40
Peso de los 1000 granos	41
Índice de cosecha	41
3.4.3. EFICIENCIA EN EL USO DE LA PRECIPITACIÓN Y DEL AGUA	41
3.5. ANALISIS ESTADÍSTICO	42
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
4.1. CONDICIONES CLIMÁTICAS	45
4.2. GARBANZO	46
4.2.1. CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO (CAS)	46
Siembra	47
Cosecha	52
4.2.2. RENDIMIENTO DE GRANO	54
4.2.3. COMPONENTES DE RENDIMIENTO	58
Granos vaina ⁻¹	58
Vainas m ⁻²	59
Peso de los 1000 granos	60
4.2.4. ÍNDICE DE COSECHA (HI)	61
4.2.5. EFICIENCIA EN EL USO DE LA PRECIPITACIÓN (PUE)	63
4.2.6. USO DEL AGUA (WU)	65
4.2.7. EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA (WUE)	66
4.3. GIRASOL	67
4.3.1. CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO (CAS)	67
Siembra	68
Cosecha	70
4.3.2. RENDIMIENTO DE GRANO	73
4.3.3. COMPONENTES DE RENDIMIENTO	76
Granos capítulos ⁻¹	76
Capítulos m ⁻²	78
Peso de los 1000 granos	78
4.3.4. ÍNDICE DE COSECHA (HI)	79
4.3.5. EFICIENCIA EN EL USO DE LA PRECIPITACIÓN (PUE)	80
4.3.6. USO DEL AGUA (WU)	82
4.2.7. EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA (WUE)	83
4.4. HABAS	84
4.4.1. CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO (CAS)	84
Siembra	85

Cosecha	88
4.4.2. RENDIMIENTO DE GRANO	90
4.4.3. COMPONENTES DE RENDIMIENTO	93
Granos vaina ⁻¹	93
Vainas m ²	95
Peso de los 1000 granos	96
4.4.4. ÍNDICE DE COSECHA (HI)	97
4.4.5. EFICIENCIA EN EL USO DE LA PRECIPITACIÓN (PUE)	99
4.4.6. USO DEL AGUA (WU)	101
4.4.7. EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA (WUE)	102
5. CONCLUSIONES	105
6. REFERENCIAS	109

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Precipitación anual y estacional, temperaturas media de máximas y mínimas durante 9 años en Córdoba.

Figura 2. Contenido de agua en el suelo (CAS) en siembra en el cultivo de garbanzo influenciado por el año y sistema de laboreo según la profundidad de suelo.

Figura 3. Contenido de agua en el suelo (CAS) en cosecha en el cultivo de garbanzo influenciado por el año y sistema de laboreo según la profundidad de suelo.

Figura 4. Efecto del año x laboreo en el rendimiento del grano del cultivo del garbanzo.

Figura 5. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el rendimiento del grano del cultivo del garbanzo.

Figura 6. Efecto del laboreo x dosis de N fertilizante en el número de granos vaina⁻¹ del cultivo del garbanzo.

Figura 7. Efecto del año x laboreo en el número de vainas m⁻² del cultivo del garbanzo.

Figura 8. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el número de vainas m⁻² del cultivo del garbanzo.

Figura 9. Efecto del año x laboreo en el peso de los 1000 granos del cultivo del garbanzo.

Figura 10. Efecto del año x laboreo en el índice de cosecha (HI) del cultivo del garbanzo.

Figura 11. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el índice de cosecha (HI) del cultivo del garbanzo.

Figura 12. Efecto del año x laboreo en la eficiencia en el uso de la precipitación (PUE) del cultivo del garbanzo.

Figura 13. Efecto del año x laboreo en el uso del agua (WU) del cultivo del garbanzo.

Figura 14. Efecto del año x laboreo en la eficiencia en el uso del agua del cultivo del garbanzo.

Figura 16. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el contenido de agua en el suelo (CAS) en el perfil 60-90 cm de siembra en el cultivo de girasol.

Figura 17. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el contenido de agua en el suelo (CAS) en el perfil 0-30 cm de cosecha en el cultivo de girasol.

Figura 18. Efecto del laboreo x la dosis de N fertilizante en el contenido de agua en el suelo (CAS) en el perfil 0-30 cm de cosecha del cultivo de girasol.

Figura 19. Efecto del año x laboreo en el contenido de agua en el suelo (CAS) en el perfil 60-90 cm de cosecha del cultivo de girasol.

Figura 20. Efecto del año x laboreo en el rendimiento del grano del cultivo de girasol.

Figura 21. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el rendimiento del grano del cultivo de girasol.

Figura 22. Efecto del año x laboreo en el número de granos capítulo⁻¹ del cultivo de girasol.

Figura 23. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el número de granos capítulos⁻¹ del cultivo de girasol.

Figura 24. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el índice de cosecha (HI) del cultivo de girasol.

Figura 25. Efecto del año x laboreo en la eficiencia en el uso de la precipitación (PUE) del cultivo del girasol.

Figura 26. Efecto del año x dosis de N fertilizante en la eficiencia en el uso de la precipitación (PUE) del cultivo del girasol.

Figura 27. Efecto del año x dosis de N fertilizante en la eficiencia en el uso del agua (WUE) del cultivo del girasol.

Figura 28. Contenido de agua en el suelo (CAS) en siembra del cultivo de habas influenciado por el año y sistema de laboreo según la profundidad de suelo.

Figura 29. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el CAS del perfil 30-60 cm de siembra en el cultivo de las habas.

Figura 30. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el contenido de agua en el suelo (CAS) del perfil 60-90 cm de siembra en el cultivo de las habas.

Figura 31. Contenido de agua en el suelo (CAS) en cosecha del cultivo de habas influenciado por el año y sistema de laboreo según la profundidad de suelo.

Figura 32. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el contenido de agua en el suelo (CAS) del perfil 30-60 cm de cosecha en el cultivo de las habas.

Figura 33. Efecto del año x laboreo en el rendimiento de grano del cultivo de las habas.

Figura 34. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el rendimiento de grano del cultivo de las habas.

Figura 35. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el número de granos vaina⁻¹ del cultivo de las habas.

Figura 36. Efecto del año x laboreo en el número de vainas m⁻² en el cultivo de las habas.

Figura 37. Efecto del año x laboreo en el peso de los 1000 granos (g) del cultivo de las habas.

Figura 38. Efecto del año x laboreo en el índice de cosecha (HI) del cultivo de las habas.

Figura 39. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el índice de cosecha (HI) del cultivo de las habas.

Figura 40. Efecto del año x laboreo en la eficiencia en el uso de la precipitación (PUE) del cultivo de las habas.

Figura 41. Efecto del año x dosis de N fertilizante en la eficiencia en el uso de la precipitación (PUE) del cultivo de las habas.

Figura 42. Efecto del año x laboreo en el uso del agua (WU) del cultivo de las habas.

Figura 43. Efecto del año x laboreo en la eficiencia en el uso del agua (WUE) del cultivo de las habas.

Figura 44. Efecto del año x dosis de N fertilizante en la eficiencia en el uso del agua (WUE) del cultivo de las habas.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Principales variables climáticas de la zona de estudio.

Tabla 2. Resultados de los análisis físico-químicos del suelo de Malagón.

Tabla 3. Fechas, dosis de siembra y cultivares utilizados en el experimento Malagón.

Tabla 4. Efecto significativo del año, sistema de laboreo y dosis de N fertilizante en el contenido de agua del suelo del cultivo de garbanzo durante 9 años.

Tabla 5. Contenido de agua en el suelo de siembra ($\times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) en el perfil completo y en el primer perfil de cosecha en la interacción año \times dosis de N fertilizante en el cultivo del garbanzo.

Tabla 6. Contenido de agua en el suelo ($\times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) en los perfiles 0-30, 60-90 cm de siembra y en el primer perfil 0-30 cm de cosecha en la interacción laboreo \times dosis de N fertilizante en el cultivo del garbanzo.

Tabla 7. Efecto significativo del año, sistema de laboreo y dosis de N fertilizante en el rendimiento de grano (kg ha^{-1}), número de granos vaina⁻¹, vainas m^{-2} , peso de los 1000 granos (g) e índice de cosecha (HI) en el cultivo de garbanzo durante 9 años.

Tabla 8. Efecto significativo del año, sistema de laboreo y dosis de N fertilizante en la eficiencia en el uso de la precipitación (PUE), uso del agua (WU) y eficiencia en el uso del agua (WUE) en el cultivo de garbanzo durante 9 años.

Tabla 9. Efecto significativo del año, sistema de laboreo y dosis de N fertilizante en el contenido de agua en el suelo (CAS) en el cultivo de girasol durante 9 años.

Tabla 10. Efecto significativo del año, sistema de laboreo y dosis de N fertilizante en el rendimiento de grano (kg ha^{-1}), número de granos vaina⁻¹, vainas m^{-2} , peso de los 1000 granos (g) e índice de cosecha (HI) en el cultivo de girasol durante 9 años.

Tabla 11. Efecto significativo del año, sistema de laboreo y dosis de N fertilizante en la eficiencia en el uso de la precipitación (PUE), en el uso del

agua (WU), eficiencia en el uso del agua (WUE) en el cultivo de girasol durante 9 años.

Tabla 12. Efecto significativo del año, sistema de laboreo y dosis de N fertilizante en el contenido de agua del suelo del cultivo de las habas durante 8 años.

Tabla 13. Efecto significativo del año, sistema de laboreo y nitrógeno fertilizante en el rendimiento de grano (kg ha^{-1}), granos vaina⁻¹, vainas m^{-2} , peso de los 1000 granos (g) e índice de cosecha (HI) en el cultivo de habas durante 8 años.

Tabla 14. Efecto del año, sistema de laboreo y N fertilizante residual en la eficiencia en el uso de la precipitación (PUE), en el uso del agua (WU) y en la eficiencia en el uso del agua (WUE) en el cultivo de habas durante 8 años.

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

A principios del siglo XXI, se estimó que la superficie mundial cultivada alcanzaba 1.5×10^9 ha, correspondiendo el 74 % (1.1×10^9 ha) a cultivos de secano, cuya superficie abastecería entre un 60-65 % de los alimentos en el mundo. A finales del siglo XX se incrementó la superficie dedicada al riego, sobre todo en los países desarrollados, siendo este el responsable del 87 % del consumo de agua dulce en el mundo (Shiklomanov, 1999). En el futuro, el suministro de agua para el riego competirá con la demanda de agua por parte de los núcleos urbanos, las industrias de manufacturación y las necesidades de agua para la gestión ambiental y de los espacios naturales (Moroke *et al.*, 2011).

La agricultura de secano generalmente está dedicada a la producción de cultivos en grano, tanto para consumo humano como para el consumo animal, mientras que el riego se dedica a cultivos de mayor valor añadido y coste económico. La productividad de los cultivos de cereales de secano, sobre todo aquellos que se cultivan en ambientes más desfavorables, resulta insuficiente para hacer frente al crecimiento de la demanda de alimentos a nivel mundial, por lo que es necesario trabajar en la mejora y en la gestión de dichos cultivos. Por otra parte, en las áreas donde la precipitación anual es baja el suelo tiende a degradarse, presentando en muchos casos una baja fertilidad, y generalmente los agricultores poseen escasos recursos para mejorar estas condiciones.

Para hacer frente a la sequía y a otros problemas del cultivo en secano en áreas sensibles, algunos agricultores han desarrollado diversas estrategias encaminadas a minimizar los riesgos. Principalmente se pueden clasificar en dos tipos: estrategias de extensión de riesgos y de reducción de riesgos.

Las estrategias de extensión de riesgo o pérdidas de manejo son estrategias diseñadas para minimizar las consecuencias de las pérdidas, e incluyen el almacenamiento en épocas de cosecha abundante, las operaciones de

rescate, la acumulación de bienes financieros, la reducción de los compromisos financieros en los años de sequía, adquisición de préstamos y otras medidas y actuaciones similares.

Las estrategias de reducción de riesgo son las que se llevan a cabo antes de que ocurran los daños, e incluye la diversificación de cultivos, los ajustes inter-estacionales de la fecha de siembra, rotaciones de cultivo, aplicación de técnicas de manejo de agua y suelo etc.

1.1. CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO

En las zonas de clima Mediterráneo bajo condiciones de secano, los cultivos están sujetos a las fluctuaciones de la precipitación recibida en el ciclo de cultivo. Las pérdidas más importantes de agua en el perfil se producen a través de la evaporación directa desde el suelo, pudiendo considerarse las pérdidas por drenaje insignificantes (López-Bellido *et al.*, 2007a). Corbeels *et al.* (1998) cuantificaron que las pérdidas por evaporación directa constituían en torno al 80 % del total de la evapotranspiración estacional. Es por ello que los principales esfuerzos realizados para mejorar el almacenamiento de agua en el suelo, se han centrado en técnicas que reduzcan este flujo de pérdida de agua (López-Bellido *et al.*, 2007a).

El sistema de manejo de cultivo que utilizemos afecta a los procesos de evaporación de diferente manera, provocando la variación de la energía disponible, afectando a la cantidad de agua disponible en el perfil, y por último modificando la proporción de intercambio gaseoso entre el suelo y la atmósfera (Hatfield *et al.*, 2001). Para reducir la evaporación y/o mitigar el efecto de la pérdida de agua en la producción, el manejo de los sistemas agrícolas debería considerar:

- Rotaciones de cultivos adaptados a estaciones lluviosas.
- Prácticas agrícolas para maximizar la conservación de agua.

- Manejo del suelo para prevenir la compactación y la formación de costra del suelo. El laboreo aumenta la rugosidad de la superficie del suelo y rompe la costra.
- Control con pesticidas.
- Adecuada preparación del lecho de siembra, fertilización y fecha de siembra.

1.1.1. EFECTO DEL SISTEMA DE LABOREO SOBRE EL CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO

Hoy día, el sistema de laboreo convencional mediante el uso del arado de vertedera es cuestionado en muchas de sus tradicionales ventajas, que empíricamente se han sostenido durante siglos, con la aparición cada vez más intensiva de problemas derivados de dicha práctica que afectan a la conservación y fertilidad de los suelos. El laboreo afecta tanto a procesos bióticos como abióticos, de forma directa modificando propiedades estructurales como grietas, agregados y continuidad de los poros, o bien de manera indirecta afectando por ejemplo a la aireación, temperatura o humedad (Huwe, 2003). Según Loomis y Connor (1992), cada suelo y cada sistema agrícola va a presentar diferentes tipos de problemas y por tanto diferentes soluciones de laboreo.

Existen dos zonas del suelo donde la estructura se ve afectada por el laboreo, la superficie y los primeros centímetros del perfil (varía según el apero). La modificación de la estructura del suelo al labrarlo provoca cambios en la conductividad y permeabilidad característica para el agua, temperatura, aireación, así como para el transporte de nutrientes y su distribución. El laboreo convencional homogeniza la zona del perfil que afecta al patrón de infiltración, reduciéndolo e incrementando el riesgo de erosión cuando se satura. Esta transformación afecta en principio a la zona superficial del perfil hasta la

profundidad de labor, pero debido a la propagación de tensiones que se produce, llega a afectar a zonas más profundas provocando la compactación de las mismas (suela de labor) (Huwe, 2003).

Aunque la principal causa de degradación de los suelos en el mundo es de naturaleza química, Lal *et al.* (1995) señalaron que también existe una fuerte limitación física a la productividad de los mismos (fertilidad física), y que incluye fenómenos como el sellado, la formación de costra superficial, la compactación o la erosión, provocados por la exposición directa a los fenómenos meteorológicos. El mantenimiento o no de una cubierta vegetal en las épocas más críticas en las que se producen estos fenómenos erosivos, depende del sistema de laboreo o manejo que utilicemos. En este sentido, el laboreo de conservación (no laboreo y laboreo mínimo) intenta minimizar los efectos de estos fenómenos erosivos. El concepto de laboreo de conservación, revisado por Blevins y Frye (1993), se presenta como una alternativa viable al laboreo convencional del suelo. El término laboreo de conservación engloba diferentes prácticas de manejo del suelo, que tienen en común la no inversión del suelo por el laboreo, manteniendo gran parte de los residuos vegetales con el fin de proteger la superficie del impacto de las gotas de lluvia y reducir las posibles pérdidas de suelo por erosión, a la vez que aumenta la infiltración de agua en el perfil y se reduce la evaporación superficial (Hatfield *et al.*, 2001). Entre estas prácticas se incluye el no laboreo, que ineludiblemente requiere el empleo de herbicidas específicos eficaces y de sembradoras específicamente diseñadas para ello.

Según Probert *et al.* (1987) y Coulombe *et al.* (1996), los Vertisoles presentan especiales problemas de laboreo y singulares requerimientos. El laboreo en suelo seco requiere alta potencia de tracción, y cuando está húmedo causa compactación. Debido a la textura arcillosa de los Vertisoles, con montmorillonita predominante, pueden absorber gran cantidad de agua y retenerla durante largos periodos de tiempo.

A pesar de la sensibilidad existente con los problemas de degradación de la estructura del suelo y reducción de los rendimientos, sobre los que existen numerosos informes, hay pocos datos respecto a la interacción suelo-aperos. La suela de labor puede llegar a ser un serio problema en los Vertisoles con un laboreo intensivo, ligada a evidentes cambios visibles o incremento de la densidad aparente. Otro problema que caracteriza a los Vertisoles es la formación de grietas, que tiene una relación directa con el grado y distribución por tamaño de los terrones que se forman en su superficie cuando se ara; de manera que el patrón de agrietamiento del suelo afecta al laboreo del mismo (Ahmad y Mermut, 1997). Por otra parte, según Bandyopadhyay *et al.* (2003), el patrón de agrietamiento de un suelo puede ser alterado por el sistema de laboreo y por la aplicación de enmiendas orgánicas. Las grietas del suelo proporcionan una oportunidad para la recarga de agua, que de otra manera y debido a la baja permeabilidad de estos suelos sería más lenta (Bouma, 1984; Mitchell y Van Genuchten, 1992). Por el contrario, las grietas extienden la superficie de contacto entre el suelo y el aire al interior del perfil, con lo que se incrementa potencialmente las pérdidas de agua por evaporación (Ritchie y Adams, 1974). El laboreo vertical a 25-30 cm posiblemente sea más beneficioso si se realiza sobre suelo seco que húmedo. También son frecuentes en los Vertisoles los problemas de establecimiento del cultivo debido a las malas condiciones del lecho de siembra. La presencia de terrones da lugar a un pobre contacto entre la semilla y el suelo, baja conductividad hidráulica y secado alrededor de la semilla, particularmente cuando éstas son pequeñas.

Según Blevins (1986), emplear el no laboreo en suelos con pendiente y bien drenados tiene muchas ventajas, mientras que en suelos húmedos y nivelados no parece aconsejable, al igual que en los mal drenados y pedregosos. Según dicho autor los suelos arcillosos responden peor al no laboreo; aunque en 6 años de estudio López-Bellido *et al.* (2007a) en un suelo arcilloso de la campiña del Guadalquivir no encontraron una influencia clara del efecto

comparativo del no laboreo frente al laboreo convencional respecto del rendimiento del trigo con distintas rotaciones.

Otras mejoras de las propiedades del suelo pueden derivarse del no laboreo y el mantenimiento de una cubierta de residuos vegetales en superficie. Blevins (1986) y Toderi (1987), indicaron la presencia de un mayor porcentaje de macroporos producidos por los huecos dejados por las raíces del cultivo anterior al mineralizarse, y por la actividad de las lombrices, dando lugar a una mayor infiltración de agua y aire en los horizontes más profundos y a la mejora de la estabilidad y tamaño de los agregados. Según Alvarez *et al.* (2009), los suelos cubiertos del rastrojo con el no laboreo tuvieron una menor tasa de evapotranspiración lo que condujo en muchas ocasiones a un mayor contenido de agua en el suelo a causa de la mejora en la infiltración. El aumento de la infiltración y la reducción de la evaporación son debidos a que la difusión del vapor de agua a través de la cubierta se ralentiza, ya que los residuos reducen la cantidad de radiación directa sobre la superficie, actuando como aislante frente a la conducción del calor hacia el interior del suelo. Además, los suelos arcillosos son autosellantes, es decir, la desecación de los agregados de la superficie puede bastar para desacelerar la evaporación. El papel de la cubierta de residuos de la cosecha anterior es imprescindible para obtener buenos resultados en la conservación de agua, siendo aun mejor que dicha cubierta permanezca erecta.

Según Giraldez *et al.* (1986), la lenta infiltración del agua en los Vertisoles se palía en el no laboreo por las grietas producidas con la sequía, por donde el agua de lluvia penetra más rápidamente, mientras que en el laboreo convencional estas grietas se destruyen. La suela de labor puede constituir un obstáculo añadido para la penetración del agua en estos suelos.

Sin embargo, el manejo de suelos con el no laboreo requiere unos cuidados adicionales y no siempre es recomendable su aplicación, máxime si no es avalada por una investigación previa de larga duración y de carácter multidisciplinar. Sin duda, el método de no laboreo presenta mayor flexibilidad

para las siembras de otoño en suelos pesados frente al laboreo tradicional, que depende más de las condiciones del suelo, cuyo periodo óptimo es corto e irregular en el clima mediterráneo. Por otro lado, el balance energético «output/input» es un aspecto que debe ser tenido muy en cuenta a la hora de hacer el análisis comparativo entre los diferentes sistemas de laboreo.

1.2. INFLUENCIA DEL SISTEMA DE LABOREO SOBRE EL CONTENIDO DE NITRÓGENO EN EL SUELO

El cambio de un sistema de laboreo convencional a uno de no laboreo conduce a una modificación de la flora microbiana, que es mayor en este último en los primeros 5-10 cm de suelo, produciéndose también cambios de pH (Elliott y Stott, 1997); aunque el efecto del no laboreo sobre la nitrificación y desnitrificación no está del todo dilucidado. Parece ser que en los suelos con no laboreo aumenta el contenido de N orgánico en los primeros centímetros del perfil, aunque según Rasmussen y Collins (1991) la observación de cambios significativos en la materia orgánica del suelo requiere de ensayos de larga duración.

En los suelos en los que se practica el no laboreo no se produce una mezcla directa de los residuos de cosecha con el suelo, produciéndose un retraso en su descomposición, y debido a la no alteración del suelo hay una tasa de mineralización inferior a la del suelo donde se aplica el laboreo convencional. El laboreo y la rotación de cultivos pueden modificar la materia orgánica presente, pero los resultados pueden variar debido al tipo del suelo, sistemas de cultivo, manejo de residuos, y clima (Paustian *et al.*, 1997). El laboreo produce una reducción del contenido de materia orgánica debido al intercambio de mineralización de los residuos del cultivo, a la interrupción de los agregados y al aumento de la aireación del suelo (Sainju *et al.*, 2006). Por el contrario, el laboreo de conservación (reducido y no laboreo) aumenta el carbono orgánico en superficie (Sainju *et al.*, 2006; Melero *et al.*, 2009 y López-Bellido *et al.*,

2010), mejorando los agregados del suelo (Coulombe *et al.*, 1996) y preservando los recursos del suelo mejor que las prácticas de laboreo convencional (Six *et al.*, 1998).

El contenido de nitratos también varía en el suelo, a lo largo de un periodo de cultivo, según se trate de un sistema de laboreo tradicional o no laboreo. Para Germon y Taureau (1991) esta diferencia es mínima durante el cultivo, pues las cantidades globales de N mineralizado son semejantes en ambos sistemas, aunque la cinética de mineralización es diferente. En el no laboreo, la mineralización está mejor distribuida en el tiempo a consecuencia de un nivel de humedad más elevado y constante. López-Bellido *et al.* (2013) encontraron mayor contenido de nitratos en el laboreo convencional que en el no laboreo, y sugieren la ocurrencia de una menor mineralización neta de N bajo el no laboreo debido a una menor descomposición, mayor inmovilización del N y diferencias en la nitrificación. Estudios similares como los de Soon *et al.*, 2001; McConkey *et al.*, 2002 llegaron a la misma conclusión. Power y Doran (1988) apoyan la hipótesis de una tasa similar de mineralización entre ambos sistemas de laboreo, aunque distribuidas de manera diferente a lo largo del cultivo, que al estar mejor dosificada en el tiempo en los sistemas de no laboreo beneficia a los cultivos, especialmente a los de verano. Según Toderi (1987), existen concentraciones de nitratos significativamente mayores en el laboreo convencional en los primeros 30 cm y no hay diferencias con el no laboreo a la profundidad de 30-60 cm.

1.3. ROTACIONES DE CULTIVO

En los últimos años, la sostenibilidad en la producción agrícola ha aumentado en importancia, especialmente cuando se relaciona con insumos agronómicos limitados, condiciones ambientales adversas o suelos con baja fertilidad. En estas condiciones la rotación de cultivos es una de las principales prácticas agronómicas que podrían aumentar los rendimientos y permitir una producción sostenible (Ryan *et al.*, 2008). De hecho, la rotación de cultivos es

una de las estrategias más efectivas en el control de plagas y enfermedades pudiendo a la vez mejorar los nutrientes y la eficiencia en el uso del agua (Lopez-Bellido *et al.*, 2007b). Sin embargo, en algunos ambientes Mediterráneos, el cultivo continuo sigue siendo generalizado. Esto es particularmente evidente en el sur de Italia (Maiorana *et al.*, 1992; Montemurro, 2009) donde en una gran parte de las tierras de cultivo, caracterizadas por ser campos pobres y de secano, el trigo duro es de los más cultivados.

El cultivo continuo de una misma especie en el mismo suelo, también conocido como monocultivo, es una práctica bastante extendida, generalmente motivada por razones de índole económica y de mercado, beneficiosas para el agricultor al menos a corto plazo. También tiene la ventaja de una mayor simplicidad de manejo y requiere menos inversiones en la explotación agrícola, aunque presenta un mayor riesgo frente a la diversificación de cultivos. Lithourgidis *et al.* (2006) sugiere que en áreas con condiciones climáticas difíciles y suelos de baja fertilidad no pueden ser sembrados otros cultivos. Por lo tanto, el cultivo de trigo continuo es con frecuencia considerado como la “rotación” más competitiva y con capacidad de minimizar las pérdidas por rendimiento para aumentar la productividad.

Sin embargo, el monocultivo genera numerosos problemas agronómicos, a pesar de que no todas las especies vegetales cultivadas muestran el mismo comportamiento cuando se suceden a sí mismas en el mismo terreno durante un número prolongado de años. Numerosos trabajos ponen de manifiesto estos inconvenientes y las ventajas y eficacia de las rotaciones de cultivo en diferentes situaciones y sistemas agrícolas (Conway, 1996). Melero *et al.* (2011) señalaron que, la siembra directa con rotaciones bianuales, podría ser un manejo adecuado y sostenible, que mejoraría la calidad del suelo, comparado con el trigo continuo. Un ejemplo evidente de los beneficios de la rotación lo muestra la alternativa trigo-girasol en los secanos de la campiña andaluza, modelo de eficiencia en el control de malas hierbas, plagas y enfermedades y en el

aprovechamiento del agua y los nutrientes (López-Bellido y López-Bellido, 2000). El girasol muestra tolerancia a la sequía debido a su sistema radicular extenso y profundo que le permite extraer agua y nutrientes de los horizontes más bajos (Moroke, 2002).

En el clima mediterráneo, el déficit hídrico obliga en muchos suelos a la práctica del barbecho, que suministra pasto natural para el ganado o se mantiene limpio con algunas labores. Sin embargo, el papel del barbecho es actualmente cuestionado no sólo con respecto a su capacidad para restaurar la fertilidad del suelo, sino también en relación con el potencial para almacenar agua para el cultivo siguiente y eliminar malas hierbas. El sistema cereal-barbecho en áreas secas es menos eficiente en el uso del agua y el N, que cuando el cereal se cultiva en rotación con otros cultivos (Halvorson y Reule, 1994; Unger, 1994). La rotación trigo-barbecho imposibilita tener cosecha uno de cada dos años a diferencia de una rotación trigo-leguminosa (Moroke *et al.*, 2011). También hay que tener en cuenta el riesgo por erosión que presenta este sistema, al dejar el suelo desnudo y estar expuesto a las inclemencias del tiempo.

La introducción de las leguminosas en las rotaciones de cultivos mejora la productividad del cultivo siguiente (Peoples *et al.*, 2009), aunque ésta puede variar en función del cultivo precedente, periodo de barbecho, intensificación del cultivo y laboreo reducido (Unkovich *et al.*, 2008). López-Bellido *et al.* (2011) indicaron que los procesos de fijación de N₂ están influenciados por la temperatura y el contenido de humedad del suelo. El cultivo de las leguminosas puede afectar profundamente a numerosas propiedades del suelo. Como cita Power (1990), uno de los más impresionantes ejemplos, a gran escala, del efecto de las leguminosas sobre las características del suelo es la gran mejora de la productividad de las tierras agrícolas del este, sur y suroeste de Australia desde la 2ª Guerra Mundial. Ello ha sido el resultado del uso intensivo de la «Ley Farming» en suelos infértiles, donde la alternativa de cultivo de cereal con pastos basados en leguminosas anuales como trébol subterráneo (*Trifolium*

subterraneum L.) y medicagos (*Medicago* spp.), junto a la corrección de deficiencias minerales, ha supuesto un enorme incremento de la producción, tanto de grano como de ganado.

Muchos de los efectos de las leguminosas sobre las propiedades del suelo se manifiestan a través de su influencia sobre los agregados del suelo y su estabilidad (Herridge, 1982; Reeves, 1984). El uso de las leguminosas en un sistema de cultivo puede afectar a la agregación por cambios en el contenido de materia orgánica y a la actividad microbiana del suelo. Debido a la estrecha relación C/N de los residuos de las leguminosas, la biomasa microbiana puede ser temporalmente incrementada, aumentándose la agregación por la maraña de hifas de hongos. También las leguminosas mejoran la estructura del suelo a causa del crecimiento de las raíces en profundidad, disminuyendo su densidad e incrementando el volumen de macroporos, lo cual facilita la penetración de las raíces del cultivo del cereal siguiente. Izumi *et al.* (2004) indicaron el efecto en la formación y retención de bioporos producidos por la actividad de los organismos y la descomposición de las raíces de las plantas. Por otro lado, la presencia de residuos de leguminosas y la ausencia de laboreo aumentan la población de lombrices en el suelo (Mackay y Kladvko, 1985). Así mismo la introducción de leguminosas en las rotaciones de cultivo “rompen” el ciclo de las numerosas enfermedades de los cereales (Karlen *et al.*, 1994; Conway, 1996).

Los beneficios económicos derivados de las ventajas de la rotación con leguminosas en los sistemas de cultivo tales como el aumento de los niveles de materia orgánica y la mejora de la estructura del suelo, reducción de la erosión y de la contaminación de las aguas son muy difíciles de cuantificar. Las leguminosas aportan el «efecto rotación», que incluye todo el incremento del rendimiento del cereal cuando se cultiva en rotación comparado con su rendimiento en monocultivo (Buddenhagen, 1990). El conjunto de estos efectos puede llegar hasta un 50% de incremento del rendimiento, debiéndose no sólo al

N₂ fijado biológicamente sino también a otros factores, como la mejora de las propiedades físicas del suelo, reducción de plagas y enfermedades y de los problemas de malas hierbas, eliminación de fitotoxicidad, aumento de sustancias promotoras del crecimiento, etc. (Ruselle *et al.*, 1987; Power, 1990).

1.3.1. EL EFECTO DE LAS LEGUMINOSAS EN EL NITRÓGENO DEL SUELO

Una de las claves de la sostenibilidad en la agricultura mediterránea es la conservación e incremento de la materia orgánica del suelo. El laboreo y la rotación de cultivo con leguminosas son dos prácticas de manejo que pueden influir en la dinámica del N en el sistema suelo-planta, especialmente por su efecto sobre la materia orgánica. Los residuos del cultivo de leguminosas son una fuente efectiva de N, sobre todo cuando éste es liberado en sincronía con la demanda de N del cultivo siguiente. La influencia de los residuos de cultivo sobre el N disponible para la planta depende del efecto de estos sobre la mineralización neta de otras fuentes de N del suelo. Con la aplicación de estas técnicas, el óptimo de aplicación de fertilizantes, especialmente N, debería ser más bajo en promedio, considerando la cantidad reciclada, la extracción efectiva y los residuos dejados por los cultivos.

La inclusión de una leguminosa en un sistema de cultivo reduce la relación C/N de los residuos incorporados al suelo, pudiendo alterar de forma significativa la actividad microbiana, las transformaciones de N, la disponibilidad de nutrientes y el crecimiento de la planta. Según Probert *et al.* (1987), el N aportado por las leguminosas en los Vertisoles se distribuye a través del suelo, hasta los 90 cm del perfil, y es recuperado mejor por el cultivo de trigo en comparación con el N fertilizante de la superficie. Según Power (1990), los suelos en los que históricamente se cultivan leguminosas tienden a tener más alto el nivel de materia orgánica total, lo cual mejora la calidad y fertilidad del suelo. Papastylianou (1993) y López Bellido *et al.* (1996), han constatado, en las condiciones de secano mediterráneas, el efecto positivo de las

leguminosas sobre el rendimiento del cereal. La cantidad de N₂ fijado por las leguminosas varía ampliamente con las especies, la localización, el manejo y otros factores (Heichel, 1987). El N residual que queda en el suelo para el siguiente cultivo, después de la fijación simbiótica de la leguminosa, también varía con el tipo de aprovechamiento y la forma de recolección, siendo su contribución máxima cuando son enterradas como abono verde.

La disponibilidad del N inmovilizado en los residuos de las leguminosas para los cultivos siguientes varía ampliamente, dependiendo de numerosos factores. El N de las leguminosas se mineraliza más lentamente y se utiliza de forma más eficiente que las altas dosis de N químico fertilizante. Hesterman *et al.* (1987), realizando trabajos con alfalfa y soja, demostraron que el cultivo de maíz fue capaz de utilizar hasta el 70% del N procedente de los residuos de las leguminosas. Hay que señalar que, en sistemas de no laboreo, el N disponible para el siguiente cultivo puede ser menor comparado con el disponible en laboreo convencional, el cual incorpora más profundamente los restos de plantas en el suelo. Igualmente se conoce que las leguminosas también pueden afectar a la disponibilidad de P, cationes y micro-elementos del suelo. Además, la profundidad del sistema radicular de las leguminosas frecuentemente utiliza y recicla el calcio del subsuelo y otros nutrientes, afectando a la disponibilidad y utilización de éstos para los siguientes cultivos de grano (Power, 1990).

Las leguminosas funcionan mejor en suelos de baja fertilidad nitrogenada, y su utilización es muy importante en muchos sistemas de cultivo múltiples. Su uso es particularmente relevante para el desarrollo de sistemas agrícolas de bajos inputs. Para los métodos de agricultura sostenible, las leguminosas son un método efectivo y frecuentemente rentable para suministrar N. Entre 20-22 millones de toneladas se fijan anualmente a través de la fijación simbiótica frente a los 85 millones de toneladas que se aplican de N fertilizante (Peoples *et al.*, 2009). Debido a esto existe interés en introducir leguminosas para aumentar la fijación biológica en los sistemas agrícolas. Combinando el «efecto rotación»

con el N de las leguminosas se pueden obtener altos rendimientos en los cereales. Sin embargo, la contribución del conjunto depende del sistema de manejo y del clima. Igualmente, el grado de integración con el ganado también juega un papel importante en la rentabilidad de los sistemas de cultivo con leguminosas.

La realidad actual es que las leguminosas no son demasiado empleadas en las rotaciones de cultivo cuando hay disponible N fertilizante, y dependen más del valor de su producción que de su contribución a través de la fijación de N_2 . Los sistemas de cultivo con leguminosas son un negocio incierto. Se plantea el dilema para el agricultor entre el largo plazo para construir un potencial de mejora de la fertilidad del suelo y el corto plazo de los retornos económicos de un cultivo de grano más rentable. Sin embargo, se observan profundos cambios en las políticas agrícolas de muchos países desarrollados como EEUU y de la Unión Europea, tendentes a la intensificación de la producción y al abandono de tierras de cultivo, donde podrían tener más cabida las leguminosas como fuente de N y cultivo ambientalmente favorable en una agricultura sostenible. En regiones cuyos agricultores disponen de bajos insumos la incorporación de las leguminosas en los sistemas agrícolas es mucho más económico y sostenible (Mohale et al., 2013).

1.4. RENDIMIENTO DE GRANO Y COMPONENTES DE RENDIMIENTO

El rendimiento de grano es una variable muy importante para evaluar el comportamiento de cada uno de los cultivos frente a diferentes regímenes de agua recibida en el ciclo de cultivo y poder adoptar medidas para optimizar al máximo este agua. En garbanzo y habas, los componentes de rendimiento son el número de granos vaina⁻¹, el número de vainas m⁻² y el peso de los 1000 granos. En girasol, los componentes de rendimiento son el número de grano capítulo⁻¹, los capítulos m⁻² y el peso de los 1000 granos.

Los análisis de los componentes de rendimiento pueden ser utilizados para aclarar los factores y estados de crecimiento que son críticos para determinar el rendimiento de grano. La correlación entre los componentes de rendimiento indica mecanismos de estabilización de los rendimientos en condiciones variables de cultivo.

La alta variabilidad de los rendimientos entre estaciones está causada principalmente por condiciones de desarrollo no óptimas (Thompson y Taylor, 1982). En este sentido, las siembras tempranas después de las primeras lluvias de otoño producen, generalmente, un incremento del rendimiento potencial comparado con las siembras tardías, debido a una mayor disponibilidad de agua, mayor producción de biomasa, una floración más temprana y el aumento del índice de cosecha (HI) (Loss y Siddique, 1997). Por otro lado, los años con precipitación abundante pueden dar lugar a un crecimiento vegetativo excesivo a expensas del crecimiento reproductivo (Grashoff, 1990a; Grashoff, 1990b). La competencia por los asimilados entre la parte vegetativa y la reproductiva podría causar caída de la flor y abscisión prematura de la vaina (Peat, 1982), lo que conllevaría evidentemente una disminución de los rendimientos. Por lo tanto, una primera vía de mejora de los rendimientos en ambientes en los que uno de los factores limitantes sea el agua, sería hacer coincidir ciertos estados fenológicos con el periodo de lluvias recibidas en la zona. Pero las leguminosas son plantas de crecimiento indeterminado, lo que hace más difícil hacer coincidir el ciclo de cultivo con el periodo de lluvias. La selección de variedades de ciclo más corto en aquellos lugares en que la sequía es terminal podría suponer una ventaja y un aumento del rendimiento (Thomson *et al.*, 1997; Siddique *et al.*, 1999). Sin embargo seleccionar especies o variedades de floración temprana en climas con precipitación escasa e impredecible o con riesgo de heladas no siempre va a conllevar una mejora de los rendimientos (Siddique *et al.*, 1994; Srinivasan *et al.*, 1998), del mismo modo que seleccionar variedades de ciclo más corto puede resultar en una falta de capacidad de respuesta si hubiera una precipitación adicional en un momento clave para el

cultivo. En estas zonas una evaluación más analítica y crítica del clima mejoraría los rendimientos obtenidos. En consecuencia, se considera una cualidad importante seleccionar variedades de mayor plasticidad fenológica en ambientes propensos a la sequía, zonas en las que la elección de variedades menos adaptables a los cambios ambientales sería muy arriesgada.

Otra estrategia, que puede ser aplicada con el mismo objetivo, es la utilización del laboreo de conservación o el no laboreo en lugar del laboreo convencional. Estos sistemas de laboreo están siendo adoptados cada vez más por muchos agricultores en todo el mundo, con la finalidad de mejorar la conservación del agua, controlar la erosión y reducir el gasto energético. Sin embargo, la mayor parte del interés de la utilización de estas técnicas se ha centrado en los cereales, mientras que se ha prestado muy poca atención al estudio y aplicación de las mismas a las leguminosas (Papendick *et al.*, 1988). Andel-Daiem *et al.* (1988) afirman que el no laboreo aumenta los rendimientos medios en grano y paja de las habas después de la rotación con algodón o con maíz. Otros estudios más recientes muestran que el no laboreo podría generar rendimientos similares a los obtenidos con el laboreo convencional (Izaurrealde *et al.*, 1993). Sin embargo, Izaurrealde *et al.* (1995) observaron que los rendimientos más altos en el laboreo tradicional frente al no laboreo estaban asociados a una mejora de las condiciones del sistema radicular y de la extracción del agua.

El nitrógeno rara vez es limitante para las leguminosas si se produce una efectiva nodulación con el *Rhizobium*. Muchos estudios sobre el efecto del nitrógeno fertilizante en las leguminosas muestran que no es necesaria su aplicación para obtener elevados rendimientos, contenido de proteínas o ambas cosas (Bond *et al.*, 1985). Incluso aplicar más N fertilizante reduce el rendimiento de grano pero aumenta el peso seco de la paja (Andel-Daiem *et al.*, 1988). La aplicación de N fertilizante provoca la disminución de la tasa de fijación de N₂, motivo por el que la aplicación de N fertilizante tiene un efecto

contradictorio en los rendimientos de habas (Mahler *et al.*, 1988). Sin embargo, en algunas ocasiones, es posible obtener una respuesta significativa en el rendimiento de grano con la aplicación de N fertilizante incluso cuando sucede una aparente y correcta nodulación (Papendick *et al.*, 1988). En estos casos, una aplicación de arranque de 15 a 20 kg N ha⁻¹ es beneficiosa, produciendo un establecimiento más rápido del cultivo antes de que la simbiosis Rhizobium-leguminosa se haga efectiva. Esta aplicación puede traducirse en una mayor producción de biomasa y por tanto en un mayor rendimiento de grano.

1.5. EFICIENCIA EN EL USO DE LA PRECIPITACIÓN Y EN EL ALMACENAMIENTO DE AGUA

El cultivo de habas en condiciones de secano se siembra a finales de otoño mientras que los garbanzos y girasol se siembran al final de la estación de invierno, completando todos estos cultivos su ciclo vegetativo en función de las lluvias recibidas, generalmente coincidiendo el periodo de antesis y cuajado de vainas a principios de la primavera en las habas, y finales de primavera para el cultivo del garbanzo y girasol cuando la demanda evaporativa normalmente excede a la precipitación recibida. El agua se convierte por tanto en el factor limitante en la producción de estos cultivos, siendo el objetivo de manejo, aumentar la producción para obtener la mayor cantidad de crecimiento por unidad de agua disponible (Amir *et al.*, 1991). Sin embargo, el conocimiento y la interpretación de la eficiencia en el uso de la precipitación en los rendimientos, presenta complicaciones por los altos grados de complejidad de estos sistemas, debido a la variabilidad entre estaciones, la variación en la respuesta de los cultivos al tipo de suelo y el manejo de técnicas agrícolas (Asseng *et al.*, 2001). El aumento en la eficiencia en el uso de la precipitación en el último siglo se atribuye a la mejoras de las técnicas agrícolas (Turner, 2004), aunque Stephens (2002) considera tres factores, uno atribuible a nuevos cultivares y los otros dos factores al manejo de técnicas agrícolas. Según Hatfield *et al.* (2001) la eficiencia en el uso de la precipitación (PUE) se puede

modificar a través de la intensificación en el sistema de crecimiento en ambientes semiáridos. La intensificación del sistema de crecimiento aumenta la disponibilidad del agua en el suelo, mejorando la PUE y por lo tanto, beneficiando a la productividad de nuestro sistema de cultivo.

El uso del agua (WU) se puede mejorar de diferentes maneras: i) aumento en el almacenamiento del agua del suelo, ii) variación en la transpiración del cultivo y iii) mejora de la densidad radicular.

Las prácticas de manejo, tales como el sistema de laboreo, aporte de nutrientes, mejoras en el control de malas hierbas, enfermedades, plagas, fecha de siembra y densidad de siembra, secuencias de cultivo que minimizan los periodos de barbecho o emplean cultivares adaptados, pueden modificar la eficiencia en el uso del agua (WUE) (Turner, 2004; Nielsen *et al.*, 2005). El empleo de estrategias que aumenten el crecimiento del cultivo en la fase vegetativa podría mejorar las expectativas de WUE cuando la evaporación y el déficit de presión de vapor son bajos, así como también se podría mejorar la WUE con una cubierta adicional en el cultivo (Angus y van Herwaarden, 2001). En muchas regiones secas, los cultivos no utilizan toda el agua disponible en el perfil del suelo debido a la restricción del sistema radicular por circunstancias de tipo físico, químico o biológico. Las prácticas agrícolas que reducen los impedimentos físicos del crecimiento radicular pueden propiciar el aumento de los rendimientos en regiones secas con un aporte limitado de agua (Turner, 2004). Las modificaciones en la superficie del suelo pueden influir en los componentes de la ecuación de WUE. Tales modificaciones, asociadas de alguna forma con la manipulación de dicha superficie del suelo por el laboreo y la conservación de los residuos en dicha superficie, podrían mejorar la capacidad de retención del agua en el suelo, la disponibilidad del sistema radicular para extraer más agua del perfil y reducir las pérdidas por infiltración (Hatfield *et al.*, 2001). Las condiciones del suelo también pueden cambiar con un cultivo precedente, mejorando la WUE en el siguiente cultivo (Anderson,

2005; Tanaka *et al.*, 2005), como por ejemplo mediante el cultivo de especies cuyo sistema radicular alcanza perfiles más profundos, alterando las condiciones del suelo y proporcionando más poros para un cultivo posterior (Turner, 2004). La WUE de algunos cultivos también se puede mejorar por una intensificación del sistema de crecimiento (Nielsen *et al.*, 2002).

Muy pocos estudios han sido realizados sobre la PUE, WU y WUE en los cultivos de habas, garbanzo y girasol que permitirían tomar decisiones más rentables en las rotaciones de cultivo dentro de los suelos Vertisoles en los sistemas agrícolas mediterráneos de secano.

2. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

Evaluar el efecto del sistema de laboreo y el N fertilizante en las condiciones de los Vertisoles de secano de la campiña andaluza en los cultivos de garbanzo, girasol y habas en relación con:

- El contenido de agua del suelo en siembra y cosecha.
- El rendimiento de grano y componentes de rendimiento.
- El índice de cosecha
- La eficiencia en el uso de la precipitación
- El uso del agua
- La eficiencia en el uso del agua.

3. MATERIAL Y MÉTODOS.

3.1. LOCALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO

El experimento de campo se llevó a cabo en la finca Malagón, situada en la campiña del Guadalquivir, término municipal de Santa Cruz (Córdoba), a 37° 46' N, 4° 31' O y a una altitud media de 280 m sobre el nivel del mar.

3.1.1. CLIMA

El clima de la zona donde se encuentra emplazado el experimento es Mediterráneo Subtropical, con invierno tipo *Citrus* y verano tipo *Algodón*, según la clasificación de Papadakis. Los valores medios de las principales variables climáticas se relacionan en la Tabla 1.

Tabla 1. Principales variables climáticas de la zona de estudio.

Variables climáticas	Valor medio
Tª media anual	17,5 °C
Tª media mes más frío	9,5 °C
Tª media mes más cálido	27,5 °C
ETP media anual	1000 mm
Precip. media anual	550-750 mm
Déficit medio anual	600 mm

La duración media del periodo de heladas es de 3-4 meses según el Criterio de Emberger y la del periodo seco, de 4 a 6 meses. La precipitación de invierno supone aproximadamente un 39% de la precipitación media anual (200-300 mm), correspondiendo a las precipitaciones de otoño y primavera porcentajes del 29% (150-200 mm), iguales para ambas épocas. La precipitación de verano no representa un aporte significativo a la media en los datos globales.

3.1.2. CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

El suelo es un Vertisol, muy común en la campiña media del Guadalquivir (Typic Haploxererts). Estos Vertisoles se caracterizan por un elevado contenido de arcilla, bajo contenido de materia orgánica y alta capacidad de intercambio catiónico. Los principales índices físico-químicos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de los análisis físico-químicos del suelo de Malagón.

Análisis físico-químicos	Profundidad (cm)		
	0-30	30-60	60-90
Elementos gruesos (%)	0.05	0.15	0.15
Arena(g kg ⁻¹)	127 (17) ^a	143 (19)	187(21)
Limo (g kg ⁻¹)	179 (20)	152 (20)	26 (5)
Arcilla (g kg ⁻¹)	694 (35)	705 (37)	787 (39)
Clasificación (FAO, 1977)	Arcilloso	Arcilloso	Arcilloso
pH en agua en suspensión 1: 2.5	7.7 (0.15)	7.6 (0.15)	7.6 (0.1)
Materia orgánica (g kg ⁻¹)	9.6 (0.7)	5.3 (1.1)	2.9 (0.5)
Fósforo asimilable (mg kg ⁻¹)	4.9 (1)	1.5 (0)	1.5 (0.7)
Potasio asimilable (mg kg ⁻¹)	531 (36)	257 (15)	249 (94)
Caliza activa (g kg ⁻¹)	70 (9)	70 (10)	69 (7)
Carbonato cálcico equ. (g kg ⁻¹)	75 (13)	93 (41)	71 (5)
CIC (cmol kg ⁻¹)	46.5 (3.7)	36.6 (5.4)	30 (6.9)
Calcio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	38.7 (6.2)	28.5 (7.9)	22.9 (3.9)
Magnesio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	4.5 (2.3)	5 (2.3)	6 (1.8)
Sodio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0.9 (0.2)	2.5 (0.6)	4.3 (1.3)
Potasio intercambiable (cmol kg ⁻¹)	1.3 (0.1)	0.7 (0)	0.5 (0.1)

^a Entre paréntesis se expresan los errores estándar de las medias.

3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

El estudio se llevó a cabo en el seno del experimento de larga duración “Malagón”, iniciado en 1986. Se marcó de forma permanente una parcela uniforme de 24975 m² (135 x 185 m), en la que se situó el campo de experimentación. El diseño experimental es aleatorio en parcelas sub-subdivididas, perteneciendo cada parcelación y subparcelación a un tratamiento diferente, con cuatro repeticiones por tratamiento. Los tratamientos son: sistema de laboreo (laboreo convencional y no laboreo) como parcela principal; rotación de cultivos bianual (trigo-girasol, trigo-garbanzos, trigo-habas, trigo-barbecho y monocultivo de trigo) como subparcela; y dosis de N fertilizante aplicado siempre al trigo (0, 50, 100 y 150 kg N ha⁻¹) como sub-subparcela. Cada rotación está duplicada en la secuencia inversa con el fin de obtener información anual de todos los cultivos. El tamaño de la parcela elemental (sub-subparcela) es de 50 m² (10 m x 5 m).

3.3. TÉCNICAS Y MATERIAL UTILIZADO

La siembra de las parcelas de no laboreo se efectuó con una sembradora específica “Great Plains” que lleva incorporada una tolva dosificadora de abono. La reja que localiza y entierra la semilla es la única labor que recibe el suelo en el no laboreo. El control de malas hierbas en el no laboreo, antes y después del cultivo, se realizó con sucesivos tratamientos de glifosato [N-(fosfometil) glicina] + MCPA [ácido 2-(4-cloro 2-metilfenoxi) acético] a las dosis de 0.5 + 0.5 l ha⁻¹, respectivamente. El laboreo convencional consistió en alzar el suelo con un arado de vertedera tras la cosecha del cereal, seguido de varias labores de grada de discos y/o escarificador para desmenuzar los terrones y preparar el lecho de siembra de todos los cultivos. Los residuos de cultivo en el método de no laboreo fueron dejados en el suelo, permaneciendo como “mulching”, y en el laboreo convencional fueron incorporados al suelo. La parcela de barbecho permaneció

limpia de malas hierbas todo el año, utilizándose glifosato + MCPA en el método de no laboreo y labores de grada en el laboreo convencional.

Las fechas y dosis de siembra, y el cultivar utilizado en cada uno de los cultivos fueron los que se exponen en la Tabla 3.

Tabla 3. Fechas, dosis de siembra y cultivares utilizados en el experimento Malagón.

Cultivo	Cultivar	Fecha de siembra	Dosis (kg ha ⁻¹)
Trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.)	Gazul	Final Noviembre	180
Habas (<i>Vicia faba</i> L.)	Alameda	Noviembre	190
Garbanzos (<i>Cicer arietinum</i> L.)	Zoco	Febrero	100
Girasol (<i>Helianthus annuus</i> L.)	Sanbro	Febrero	4

Las dosis de N fertilizante se aplicaron a las parcelas de trigo en forma de nitrato amónico del 33.5 %, la mitad de la dosis en siembra y el resto en el inicio del encañado del trigo. En el resto de cultivos no se efectuó ninguna aplicación de abonado nitrogenado.

En todas las parcelas de trigo se realizó un abonado con fósforo, a la dosis de 65 kg P ha⁻¹, localizado cerca de la semilla mediante la dosificadora acoplada a la sembradora. Los altos niveles de K asimilable del suelo no aconsejaron utilizar fertilizante potásico.

En cada cultivo se efectuaron las prácticas habituales. El control de malas hierbas se realizó con los siguientes herbicidas específicos: diclofop metil [2- (4-(2,4-diclorofenoxi) fenoxi) propionato de metilo] + tribenuron [metil 2- (((N- (4-metoxi 6-metil 1,3,5-triazin 2-il) N-metilamino) carbonil) amino) sulfonil) benzoato] a 0.9 l i.a. ha⁻¹ y 15 g i.a. ha⁻¹, respectivamente, para el trigo; trifluralina [N, N-dipropil 2,6-dinitro 4-trifluoro-metilanilina] a 0.7 l i.a. ha⁻¹ en el girasol; y cianazina [2- (4-cloro 6-etilamino 1,3,5-triazin 2-ilamino) 2- metil propionitrilo] a

2 kg i.a. ha⁻¹ para habas y garbanzos. El control químico de plagas y enfermedades se realizó en función de las observaciones y los umbrales críticos de daños, con los productos más idóneos según su eficacia, toxicidad y persistencia.

3.4. DETERMINACIONES Y ANÁLISIS

Todas las determinaciones y medidas fueron realizadas en las parcelas de garbanzo, girasol y habas tanto de no laboreo como de laboreo convencional y para las dosis 0, 50, 100 y 150 kg N ha⁻¹. Las mediciones se efectuaron en las campañas agrícolas 1999-2000, 2000-2001, 2001-2002, 2002-2003, 2003-2004, 2005-2006, 2006-2007, 2007-2008 y 2008-2009. Estas fueron:

- Contenido de humedad en siembra y cosecha.
- Eficiencia en el uso de la precipitación y uso del agua.
- Rendimiento de grano y componentes de rendimiento de cada uno de los cultivos.

3.4.1. CONTENIDO DE AGUA DEL SUELO

La medida del contenido de agua del suelo fue tomada antes de siembra y después de cosecha, hasta una profundidad de 90 cm en intervalos de 30 cm. El aparato utilizado fue la sonda ThetaProbe ML2 (AT DELTA- Devices, UK).

3.4.2. RENDIMIENTO EN GRANO Y COMPONENTES DE RENDIMIENTO DE CADA CULTIVO

3.4.2.1. Rendimiento en grano

Para la determinación del rendimiento de grano de cada cultivo se cosechó una superficie de 30 m² (3 x 10 m) de cada parcela de no laboreo y laboreo convencional y de las dosis 0, 50, 100 y 150 kg N ha⁻¹. La recolección se

efectuó a principios de junio con la cosechadora de ensayos “Nuserymaster Elite Plot Combine” (Wintersteiger, Austria) de 1.5 m de anchura de corte.

3.4.2.2. Componentes de rendimiento.

- Número de granos vaina⁻¹ y número de vainas m⁻².

Se tomó una muestra representativa de todas las parcelas de no laboreo y laboreo convencional y de cada una de las dosis (0, 50, 100 y 150 kg N ha⁻¹), 1 m lineal x 0.5 m en habas y 1 m lineal x 0.48 m en garbanzo. En el laboratorio se procedió al conteo manual del número de vainas y número de granos, y se obtuvo el número de vainas por unidad de muestreo (0.5 m² en habas y 0.48 m² en garbanzo), y consecuentemente el número de vainas en 1 m². El número de granos vaina⁻¹ se obtuvo de dividir el número de granos totales por el número de vainas tomados de la unidad de muestreo.

- Número de granos capítulo⁻¹ y número de capítulos m⁻².

Se tomó una muestra representativa de todas las parcelas de no laboreo y laboreo convencional y de cada una de las dosis (0, 50, 100 y 150 kg N ha⁻¹), 1 m lineal x 0.5 m en girasol. En el laboratorio se procedió al conteo del número de capítulos y número de granos, se obtuvo el número de capítulos por unidad de muestreo (0.5 m²), y consecuentemente el número de capítulos en 1 m². El número de granos capítulo⁻¹ se obtuvo de dividir el número de granos totales por el número de capítulos tomados de la unidad de muestreo.

- Peso de los 1000 granos.

Para la determinación del peso de los 1000 granos se utilizó un contador de semillas electrónico Pfeuffer (Kitzingen, Alemania) y una balanza de precisión de 0.01 g. De cada parcela de no laboreo y laboreo convencional y de las dosis (0, 50, 100 y 150 kg N ha⁻¹) se tomó una pequeña cantidad que se limpió de

impurezas y granos partidos. En el contador se separaron 1000 granos y se pesaron en la balanza.

- Índice de Cosecha.

El Índice de Cosecha es un porcentaje que resulta de la ecuación (1)

$$IC = \text{Rendimiento de grano (kg ha}^{-1}\text{)} / \text{Materia seca total} \quad (1)$$

La materia seca total se obtuvo de la recogida de una muestra representativa, 1 m lineal x 0.5 m de ancho de todas las parcelas de no laboreo y laboreo convencional de habas y girasol, 1 m lineal x 0.48 m de ancho de todas las parcelas de garbanzo de no laboreo y laboreo convencional y de cada una de las dosis (0, 50, 100 y 150 kg N ha⁻¹ aplicado al cultivo de trigo precedente). Se determinó el contenido en materia seca de cada muestra mediante secado a 105 °C durante 24 horas en una cámara de ventilación forzada, y los datos obtenidos se transformaron a kg ha⁻¹ referidos a materia seca.

3.4.3. EFICIENCIA EN EL USO DE LA PRECIPITACIÓN Y DEL AGUA

La eficiencia en el uso de la precipitación (PUE) fue calculada dividiendo el rendimiento de grano entre la precipitación recibida en el ciclo de cultivo. Este índice se expresa en kg ha⁻¹ mm⁻¹.

La eficiencia de uso del agua (WUE) representa el rendimiento de grano por unidad de agua utilizada por el cultivo, y se expresa en kg ha⁻¹ mm⁻¹. La cantidad del agua utilizada por el cultivo (WU) en una estación se determina como la suma de la lluvia en la estación de crecimiento y el contenido de agua del suelo en siembra menos el contenido de agua del suelo en cosecha a la profundidad en la que se desarrolla el sistema radicular del cultivo. Este índice incluye la evaporación desde el suelo y la transpiración del cultivo. Otros términos del

balance del agua, como la escorrentía superficial y el drenaje, se consideraron despreciables.

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados fueron sometidos a un análisis de la varianza (ANOVA) mediante el paquete estadístico Statistix v. 8.1 (Analytical Software, 2005), para determinar el efecto del año, sistema de laboreo y dosis de nitrógeno fertilizante de los diferentes parámetros estudiados. El tratamiento de las medias se realizó utilizando el test de Fisher de mínima diferencia significativa (MDS) a $P \leq 0.05$. La mínima diferencia significativa para la comparación de los diferentes tratamientos y sus interacciones fue calculada utilizando los errores estándar sugeridos por Gómez y Gómez (1984). Se estudiaron además las correlaciones entre los parámetros analizados y se calcularon los coeficientes de variación en cada análisis, los cuales fueron corregidos cuando fue preciso según Gómez y Gómez (1984), con el objeto de evaluar el grado de precisión de los resultados experimentales.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CONDICIONES CLIMÁTICAS

Según la media anual de precipitación en la zona (584 mm), los años de estudio se clasifican de la forma siguiente: 2001, 2002, 2003 y 2004 lluviosos; 2000 y 2009 normales y 2006, 2007 y 2008 secos (Figura 1).

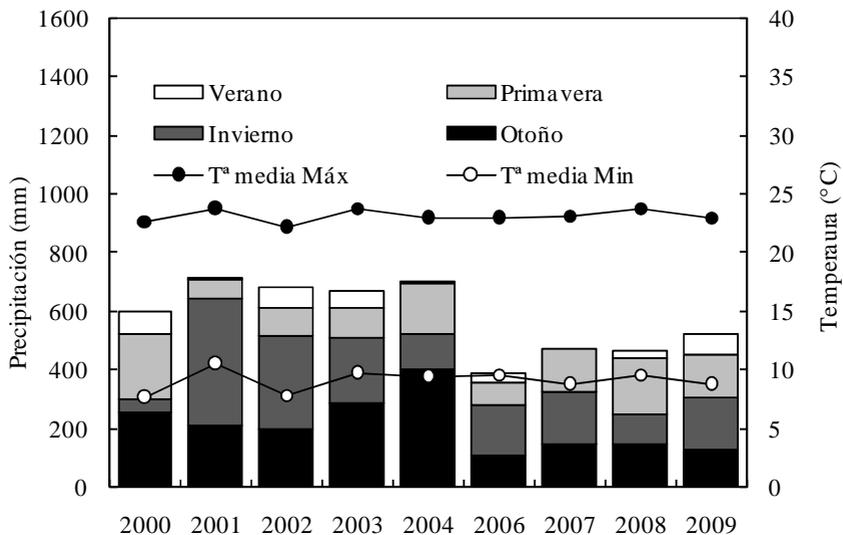


Figura 1. Precipitación anual y estacional, temperatura media de máximas y mínimas durante 9 años en Córdoba.

Las lluvias otoñales en los años de estudio variaron entre 112 mm (2005-2006) y 403 mm (2003-2004), lo cual corresponde al 25 y 57 % de la lluvia total anual, respectivamente. La lluvia de invierno representó entre un 7% (1999-2000) y un 60% (2000-2001), mientras que la lluvia de primavera estuvo entre un 10% (2000-2001) y un 40% (2007-2008). La precipitación estival fue irrelevante y se registró fuera de la estación de cultivo (Figura 1). El patrón de temperaturas fue

similar para todos los años de estudio, siendo la temperatura media de 16.1 °C, la temperatura media de mínimas de 9.5 °C y la temperatura media de máximas de 23.3 °C dentro del ciclo del cultivo (Figura 1).

4.2. GARBANZO

4.2.1. CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO (CAS)

La fuerte variación interanual de las lluvias, característica del clima Mediterráneo, indujo siempre diferencias altamente significativas en el contenido de agua en el suelo (CAS) entre los años de estudio y las profundidades de suelo analizadas, tanto en la siembra como en la cosecha (Tabla 4).

Tabla 4. Efecto significativo del año, sistema de laboreo y dosis de N fertilizante en el contenido de agua del suelo del cultivo de garbanzo durante 9 años.

Tratamiento	Contenido de agua en el suelo					
	Profundidad en siembra (cm)			Profundidad en cosecha (cm)		
	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90
Año(A)	***†	***	***	***	***	***
S. laboreo (L)	***	*	**	*	***	*
A*L	***	***	***	***	***	***
Nitrógeno (N)	ns	***	ns	ns	ns	ns
A*N	**	***	*	*	ns	ns
L*N	*	ns	*	**	ns	ns
A*L*N	ns	ns	ns	ns	*	*

* Significativa para 0.05 de nivel de probabilidad.

** Significativa para 0.01 de nivel de probabilidad.

*** Significativa para 0.001 de nivel de probabilidad.

†ns, no significativo.

El CAS difirió significativamente entre los sistemas de laboreo tanto en la siembra como en la cosecha, al igual que la interacción año x sistema de laboreo en todas las profundidades de suelo estudiadas (Tabla 4). López-Bellido *et al.* (2007a) en un estudio realizado sobre el CAS en el trigo dentro del mismo experimento, no encontraron prácticamente diferencias entre los sistemas de

laboreo, pero sí para la interacción año x laboreo tanto en la siembra como en la cosecha de todas las profundidades de estudio.

El CAS sólo difirió significativamente entre las dosis de nitrógeno fertilizante aplicada al cultivo precedente en la profundidad 30-60 cm de la siembra (Tabla 4). Sin embargo, en la interacción año x dosis de N fertilizante difirió en todas las profundidades de siembra y en 0-30 cm en cosecha. La interacción laboreo x dosis de N fertilizante mostró diferencias significativas en el CAS en las profundidades 0-30 cm, 60-90 cm de siembra y 0-30 cm de cosecha. Finalmente, la interacción año x laboreo x dosis de N fertilizante sólo influyó en el CAS de cosecha en las profundidades 30-60 cm y 60-90 cm.

- Siembra

En el horizonte 0-30 cm de suelo, el CAS varió entre $33.3 \times 10^{-2} \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ y $41.1 \times 10^{-2} \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ en los años 2006 y 2004, respectivamente. En el horizonte 30-60 cm, los datos variaron entre 29.1×10^{-2} y $43.0 \times 10^{-2} \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ en los años 2001 y 2004, respectivamente y por último en el horizonte 60-90 cm, el CAS varió entre 31.8×10^{-2} y $42.3 \times 10^{-2} \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ en los años 2008 y 2004, respectivamente (datos no mostrados).

En el conjunto de los años, el CAS fue significativamente mayor en el NL que en el LC ($38.4 \times 10^{-2} \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ frente a $36.1 \times 10^{-2} \text{ m}^3\text{m}^{-3}$) en los primeros 30 cm. Sin embargo, el CAS sólo fue mayor en el NL en este perfil en los años 2002, 2004, 2006 y 2008, coincidiendo 3 de estos 4 años con lluvias recibidas en la estación de invierno por debajo de los 170 mm (Figura 2).

En el resto de los años no hubo diferencias significativas entre los dos sistemas de laboreo (Figura 2). En el horizonte 30-60 cm también el NL registró mayor CAS que el LC en el conjunto de los años ($36.2 \times 10^{-2} \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ y $35.1 \times 10^{-2} \text{ m}^3\text{m}^{-3}$, respectivamente). Sin embargo, el CAS en el NL sólo fue mayor que en el

LC en los años 2001, 2007 y 2008; sucediendo lo contrario en el año 2002 (Figura 2).

En la capa de suelo más profunda estudiada (60-90 cm), las diferencias de CAS para el conjunto de años fueron las mismas que para las otras dos profundidades. En este último horizonte, sólo los años 2007 y 2008 tuvieron mayor CAS en el NL mientras que en el 2001 fue mayor en el LC (Figura 2). Hatfield *et al.* (2001) observaron que el NL tiene un efecto positivo sobre el CAS. El CAS no siguió el mismo patrón en las diferentes profundidades de suelo, pudiendo atribuirse esto a la variación en la distribución de la lluvia en pre-siembra y sobre todo a las diferencias de infiltración del agua en los distintos perfiles. El llenado o recarga de agua en los perfiles más profundos es un proceso lento y variable según las prácticas de manejo del suelo en la superficie.

En el NL, los restos dejados en superficie junto con los huecos creados por las raíces del cultivo precedente favorecen la infiltración del agua en el suelo. Hatfield *et al.* (2001) indicaron que mantener gran parte de los residuos vegetales en la superficie reduce las pérdidas de suelo por erosión, a la vez que aumenta la infiltración de agua en el perfil y se reduce la evaporación superficial. Pikul and Aase (1995) encontraron que la infiltración se veía aumentada debido a la protección de la superficie del suelo e Izumi *et al.* (2004), por otro lado, indicaron el efecto en la formación y retención de bioporos producidos por la actividad de los organismos del suelo y la descomposición de las raíces de las plantas.

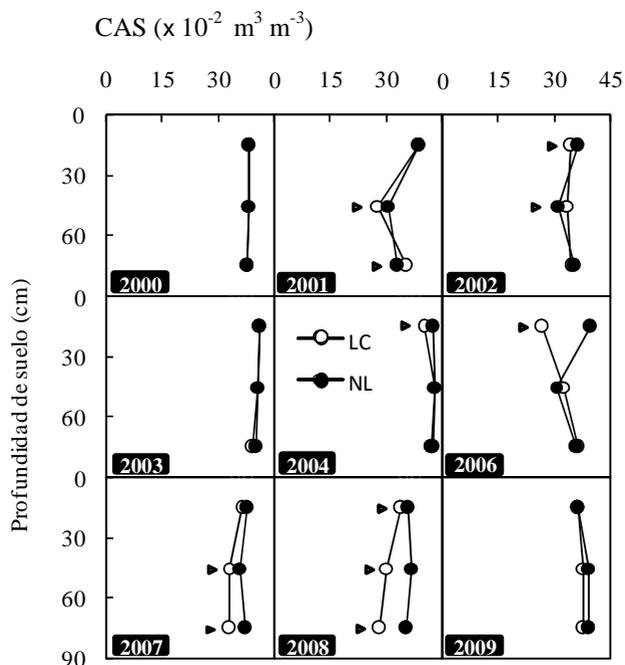


Figura 2. Contenido de agua en el suelo (CAS) en siembra en el cultivo de garbanzo influenciado por el año y sistema de laboreo (LC: laboreo convencional; NL: no laboreo) según la profundidad de suelo. El triángulo (▶) representa diferencias significativas entre sistemas de laboreo.

El CAS en el horizonte 0-30 cm sólo varió entre las dosis de N fertilizante aplicado al cultivo precedente en los años 2006, 2007 y 2008 coincidiendo con los años más secos pero sin que se pudiera relacionar las dosis de N fertilizante con el CAS en la siembra (Tabla 5). En cuanto a la interacción laboreo x dosis de N fertilizante, sólo varió en el NL, siendo las de mayor CAS las dosis 50 y 100 kg N ha⁻¹ y las de menor las dosis 0 y 150 kg N ha⁻¹ (Tabla 6).

La dosis de N fertilizante aplicado al cultivo precedente en el horizonte 30-60 cm tuvo influencia sobre el CAS en este horizonte siendo la dosis 0 kg N ha⁻¹ la que mayor CAS obtuvo con un valor de $36.7 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y la de menor la dosis de 150 kg N ha⁻¹ con un valor de $34.7 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (datos no mostrados). En

cuanto a la interacción año x dosis de N fertilizante sólo mostraron diferencias los años 2001, 2002, 2007 y 2008, coincidiendo las dosis más bajas de N fertilizante con un mayor CAS y al contrario con las dosis de N fertilizante más elevadas en estos dos últimos años (Tabla 5). Finalmente, el CAS en el horizonte 60-90 cm en la interacción año x dosis de N fertilizante sólo mostró diferencias en los años 2001, 2002 y 2008 sin que hubiera relación entre la dosis de N fertilizante y el CAS. Así mismo tampoco hubo relación entre las dosis de N fertilizante y el sistema de laboreo (Tabla 6).

Tabla 5. Contenido de agua en el suelo en siembra ($\times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) en el horizonte completo y en el primer horizonte en cosecha en la interacción año x dosis de N fertilizante en el cultivo del garbanzo.

Profundidad (cm)	Dosis N (kg ha ⁻¹)	Año								
		2000	2001	2002	2003	2004	2006	2007	2008	2009
Siembra										
0-30	0	38.1a*	38.6a	35.5a	40.9a	41.5a	31.5b	37.5ab	34.3b	36.6a
	50	38.0a	38.6a	35.1a	41.2a	40.2a	34.4a	38.5a	38.1a	36.0a
	100	38.5a	38.2a	35.6a	41.0a	41.1a	34.2a	35.3b	33.1b	36.7a
	150	38.0a	39.7a	35.3a	40.8a	41.8a	33.0a	36.0b	34.3b	35.7a
30-60	0	38.7a	29.7a	32.2a	40.7a	42.9a	32.8a	36.9a	36.2a	39.9a
	50	39.2a	31.7a	29.6b	40.5a	43.1a	31.9a	36.7a	33.5ab	38.1a
	100	38.2a	29.4a	34.2a	40.5a	42.8a	30.8a	30.5b	31.9b	38.7a
	150	37.4a	25.5b	32.5b	40.5a	43.2a	30.1a	33.0b	32.2b	37.6a
60-90	0	38.2a	33.0b	34.6ab	40.1a	42.6a	35.9a	36.1a	33.7a	39.6a
	50	37.2a	36.2a	33.3b	40.3a	42.0a	35.3a	35.4a	32.5a	38.3a
	100	37.8a	33.5b	36.3a	38.9a	42.4a	36.3a	34.0a	29.1b	38.6a
	150	37.4a	34.3ab	35.0ab	39.3a	42.4a	36.3a	34.9a	32.0a	37.5a
Cosecha										
0-30	0	27.2b	15.6b	8.2 a	7.7 a	42.7a	24.6a	15.2a	13.1ab	8.2a
	50	31.9a	19.8a	9.1 a	8.3 a	41.8ab	26.8a	13.6a	12.3ab	7.6a
	100	31.5a	15.8b	9.8 a	7.7 a	41.7ab	26.7a	14.0a	11.2b	7.3a
	150	30.4a	19.0a	8.6 a	7.7 a	39.1b	25.8a	14.6a	14.4a	6.5a

*Dentro de cada horizonte las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

- Cosecha

En el horizonte 0-30 cm de suelo, el CAS varió entre 7.4×10^{-2} y $41.3 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en los años 2006 y 2004, respectivamente. En el horizonte 30-60 cm, los datos variaron entre 17.4×10^{-2} y $29.0 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en los años 2008 y 2004, respectivamente y por último en el horizonte 60-90 cm el CAS varió entre 22.0×10^{-2} y $42.5 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en los años 2008 y 2004, respectivamente (datos no mostrados).

Tabla 6. Contenido de agua en el suelo ($\times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) en los horizontes 0-30, 60-90 cm en siembra y en el primer horizonte 0-30 cm en cosecha en la interacción laboreo x dosis de N fertilizante en el cultivo del garbanzo.

Sistema de laboreo	Dosis N (kg ha^{-1})	Profundidad (cm)		
		Siembra		Cosecha
		0-30	60-90	0-30
Laboreo convencional				
	0	36.1 c	36.2 bc	18.0 b
	50	36.1 c	36.1 bc	17.6 b
	100	35.6 c	36.3 bc	18.2 b
	150	36.5 c	35.4 c	18.5 b
No laboreo				
	0	38.2 b	38.0 a	18.1 b
	50	39.4 a	37.3 ab	20.4 a
	100	38.5 ab	36.3 bc	18.6 b
	150	37.8 b	37.8 a	18.4 b

Dentro de cada horizonte las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

El CAS registrado en el horizonte 0-30 cm fue mayor en el NL que en el LC en el conjunto de los años (18.9×10^{-2} y $18.1 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente), mientras que en la interacción año x laboreo, el NL fue mayor que el LC en el año 2006, sucediendo lo contrario en el 2002 (Figura 3).

La diferencia entre ambos sistemas de laboreo en estos dos años pudo estar relacionada con la distribución de lluvias a lo largo del ciclo del cultivo. Según López-Bellido *et al.* (2008), la variabilidad en la producción de garbanzo en secano está relacionada con la humedad residual del suelo, la textura del suelo y más estrechamente con la precipitación durante el ciclo de cultivo, generalmente irregular y escasa en la región Mediterránea. En la capa 30-60 cm de profundidad de suelo, el CAS fue mayor en el LC que en el NL (30×10^{-2} y $29 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente) en el conjunto de los años; superando el LC al NL en los años 2000, 2002, 2007, 2008 y 2009 y ocurriendo lo contrario sólo en el año 2004 (Figura 3). En el resto de los años no hubo diferencias entre ambos sistemas de laboreo.

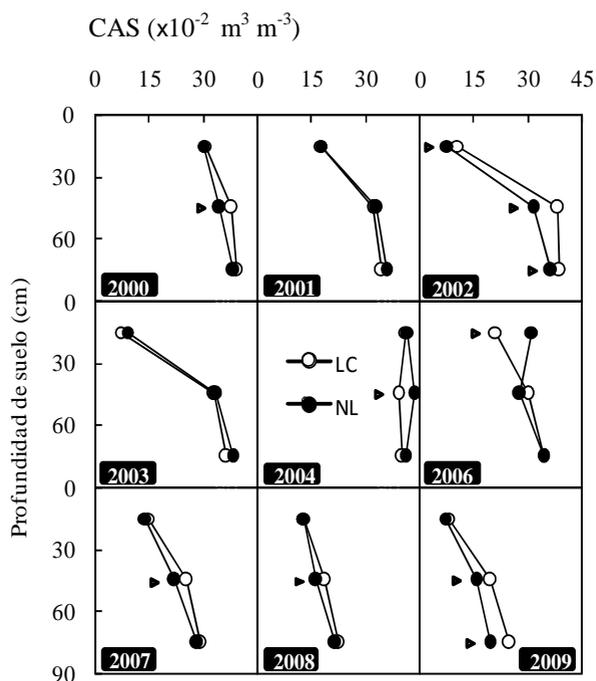


Figura 3. Contenido de agua en el suelo (CAS) en cosecha en el cultivo de garbanzo influenciado por el año y sistema de laboreo (LC: laboreo convencional; NL: no laboreo) según la profundidad de suelo. El triángulo (▶) representa diferencias significativas entre sistemas de laboreo.

Las diferencias en el CAS entre ambos sistemas de laboreo ocurrieron cuando las lluvias registradas en los meses de abril y mayo fueron superiores a los 80 mm. En estos casos, el CAS aumentó en el LC en las capas más profundas del suelo. Paralelamente, al dejar el suelo desnudo, el horizonte más superficial del LC, tuvo lugar una mayor pérdida de agua por evaporación, y como consecuencia una mayor formación de las típicas grietas del Vertisol, que facilitaría la entrada de agua en los horizontes más profundos. Según Bandyopadhyay *et al.* (2003), el patrón de agrietamiento de un suelo se puede alterar por el sistema de laboreo. Las grietas del suelo proporcionan una oportunidad para la recarga de agua de las capas más profundas de los Vertisoles que, de otra manera y debido a su baja permeabilidad, sería más lenta (Mitchell and Van Genuchten, 1992). En el horizonte 60-90 cm de suelo para el conjunto de los años, el CAS fue mayor en el LC que en el NL, aunque esta diferencia sólo se observó en los años 2002 y 2009 (Figura 3). En esta capa más profunda, tanto la infiltración como la pérdida de agua son procesos más lentos con respecto a las capas superiores. La ausencia de diferencias significativas en función del sistema de laboreo en el resto de los años puede atribuirse no sólo a las características físicas y estructurales del suelo sino también a la estructura radicular de la planta, que no le permite extraer agua de este horizonte. En efecto, la biomasa radicular del garbanzo se encuentra principalmente en los primeros 60 cm del suelo (Muñoz-Romero *et al.*, 2012).

En el horizonte 0-30 cm, el CAS para la interacción año x dosis de N fertilizante sólo varió en los años 2000, 2001, 2004 y 2008 sin que hubiera relación entre las dosis de N fertilizante aplicado al cultivo precedente y el CAS de la cosecha (Tabla 5). Así mismo tampoco hubo relación entre las dosis de N fertilizante y el sistema de laboreo (Tabla 6).

4.2.2. RENDIMIENTO DE GRANO

El rendimiento de grano fue significativo para todas las fuentes de variación estudiadas (Tabla 7).

Tabla 7. Efecto significativo del año, sistema de laboreo y dosis de N fertilizante en el rendimiento de grano (kg ha^{-1}), número de granos vaina⁻¹, vainas m^{-2} , peso de los 1000 granos (g) e índice de cosecha (HI) en el cultivo de garbanzo durante 9 años.

Tratamiento	Rendimiento grano	Granos vaina ⁻¹	Vainas m^{-2}	Peso 1000 granos	HI
Año(A)	***	***	***	***	***
S. Laboreo (L)	*	ns†	ns	*	ns
A*L	**	***	**	***	***
Nitrógeno (N)	*	ns	*	*	ns
A*N	*	ns	*	ns	***
L*N	**	***	ns	ns	ns
A*L*N	*	***	ns	ns	ns

* Significativa para 0.05 de nivel de probabilidad.

** Significativa para 0.01 de nivel de probabilidad.

*** Significativa para 0.001 de nivel de probabilidad.

†ns, no significativo.

Las variaciones de lluvia entre los años así como su distribución indujeron notables diferencias en el rendimiento de grano (Figura 1). Este varió como promedio desde 632 kg ha^{-1} en el año 2000 a 2190 kg ha^{-1} en el 2001. El rendimiento de grano estuvo relacionado con la precipitación global producida en los meses de invierno y de primavera ($r=0.74$, $P \leq 0.05$). Singh *et al.* (1997) también encontraron una correlación positiva entre la lluvia estacional y el rendimiento de grano. En el conjunto de los 9 años, el NL tuvo mayor rendimiento de grano que el LC, obteniéndose 1180 kg ha^{-1} y 1082 kg ha^{-1} , respectivamente. Sin embargo, en la interacción año x sistema de laboreo el NL registró mayor rendimiento de grano que el LC en 3 de los 9 años de estudio (2002, 2003 y 2007) mientras que sólo fue mayor para el LC en un año (2006), aunque la precipitación

recibida durante el ciclo de cultivo de este último año fue muy similar a la del año 2007 (Figura 4).

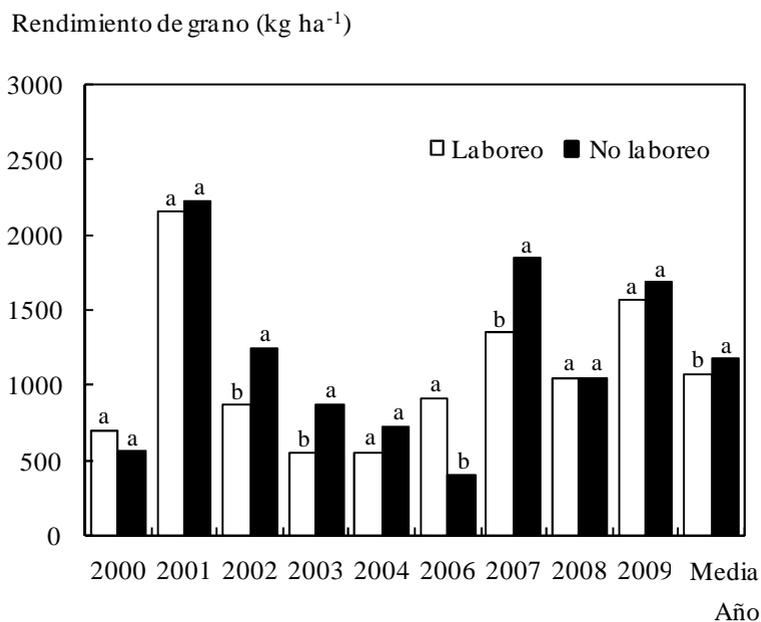


Figura 4. Efecto del año x laboreo en el rendimiento de grano del cultivo del garbanzo. Dentro de cada año, las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

En el año 2006 se registró un ataque excepcionalmente elevado de *Ascochyta blight* en el NL que no pudo ser controlado con los tratamientos habituales, y que redujo el rendimiento a más de la mitad con respecto al LC. Ello puede atribuirse a la coincidencia de condiciones favorables de humedad y temperatura para el desarrollo de la enfermedad en la fase previa de la floración del cultivo. Este hongo sobrevive en los restos de plantas en la superficie del suelo. Si hay lluvias durante el ciclo del cultivo puede dar lugar a numerosas infecciones durante todas las fases de crecimiento, aunque los ataques más severos se producen a partir de floración. Según Trapero and Kaiser (2007), la reducción de los rendimientos en garbanzo es muy dependiente del ataque de *Ascochyta*

blight, cuya enfermedad está estrechamente relacionada con las condiciones climáticas en muchas de las regiones productoras del mundo.

El rendimiento de grano estuvo influenciado por la dosis de N fertilizante aplicado al cultivo precedente, coincidiendo las dosis más bajas de N fertilizante con los menores rendimientos obtenidos y el mayor rendimiento con las dosis más altas de N sin que hubiera diferencias entre estas dosis. Estos resultados pueden indicar que en dosis bajas de N fertilizante el garbanzo no fija suficiente N para maximizar los rendimientos mientras que la dosis 150 kg N ha⁻¹ puede afectar a la fijación. Dalal *et al.* (1997) y Schwenke *et al.* (1998) mostraron que si el nitrato del suelo aumenta por la aportación de N fertilizante aplicado al cultivo precedente de trigo, podría reducir la fijación de N₂. La interacción año x dosis de

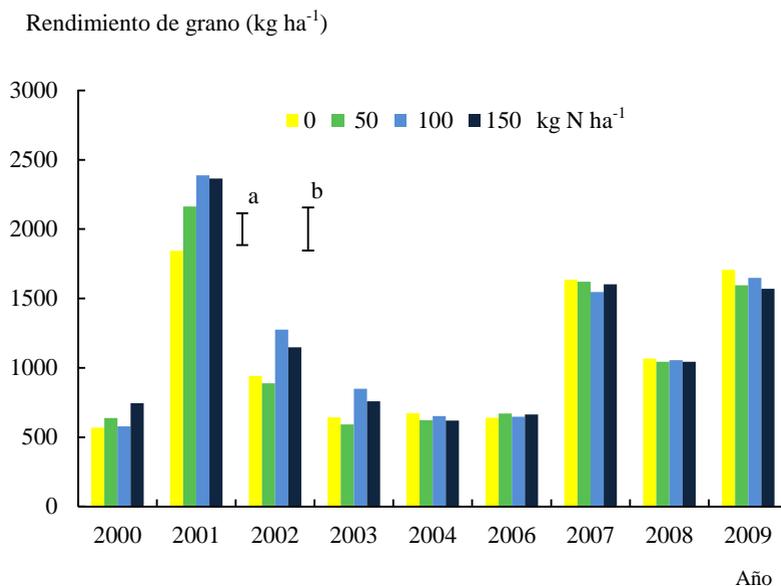


Figura 5. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el rendimiento del grano del cultivo del garbanzo. a y b representan niveles de significación al 95 % ($P \leq 0.05$) para la comparación de medias del mismo y de distinto año, respectivamente.

N fertilizante influyó mayormente en los años que fueron lluviosos a excepción del año 2004, manteniéndose que la dosis 100 kg N ha⁻¹ fue la que mayor rendimiento obtuvo sin diferencias con la dosis 150 kg N ha⁻¹ (Figura 5).

4.2.3. COMPONENTES DE RENDIMIENTO

- Granos vaina⁻¹

El número de granos vaina⁻¹ estuvo influenciado por el año, la interacción año x laboreo, laboreo x dosis de N fertilizante y el año x laboreo x dosis de N fertilizante (Tabla 7). El número de granos vaina⁻¹ medio fue de 0.93 y varió entre 0.77 y 1.05 en los años 2000 y 2008, respectivamente, coincidiendo con los resultados obtenidos por López-Bellido *et al.* (2004) dentro del mismo experimento (datos no mostrados). Estos resultados no guardaron relación con la precipitación global así como tampoco con la recibida en el ciclo de cultivo.

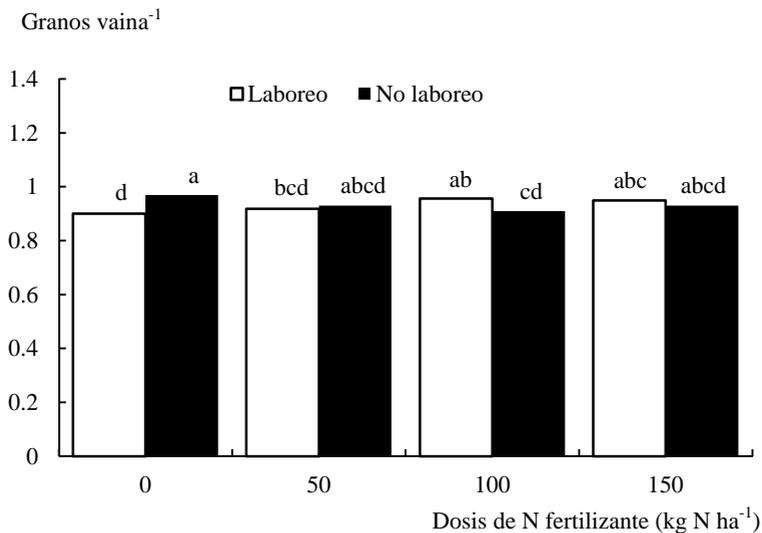


Figura 6. Efecto del laboreo x dosis de N fertilizante en el número de granos vaina⁻¹ en el cultivo del garbanzo. Las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$) en los distintos sistemas de laboreo. Existió mayor número de granos vaina⁻¹ en el LC que en el NL en los

años 2002 y 2006 y lo contrario sólo en el año 2000 (datos no mostrados). En la interacción laboreo x dosis de N fertilizante aplicado al cultivo precedente, el NL en la dosis 0 kg N ha⁻¹ tuvo mayor número de granos vaina⁻¹ que el LC mientras que en la dosis 100 kg N ha⁻¹ sucedió todo lo contrario (Figura 6).

- Vainas m⁻²

El año, la interacción año x laboreo y la interacción año x dosis de N fertilizante aplicado al cultivo precedente tuvieron un efecto significativo en el número de vainas m⁻² (Tabla 7). El número de vainas m⁻² medio fue de 575, variando los datos entre 343 y 897 en los años 2003 y 2001, respectivamente. El número de vainas m⁻² en el NL fue mayor que en el LC en dos de los 9 años (2000 y 2003) y lo contrario sólo sucedió en el 2006 (Figura 9).

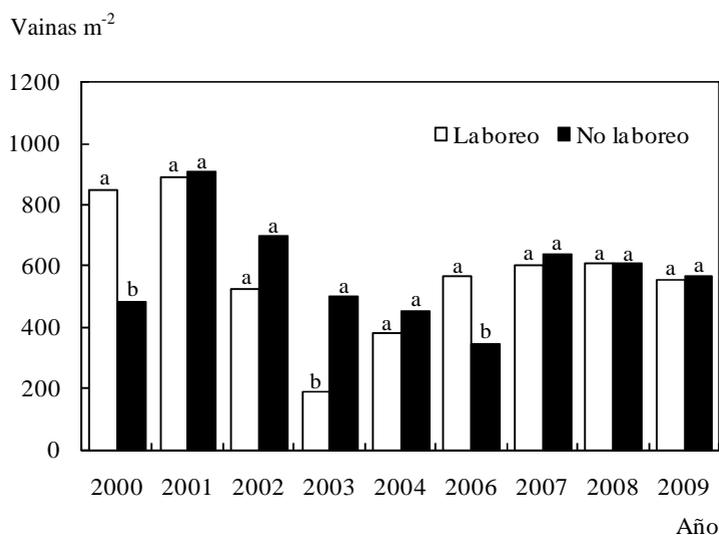


Figura 7. Efecto del año x laboreo en el número de vainas m⁻² en el cultivo del garbanzo. Dentro de cada año las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

La dosis de N fertilizante aplicado al cultivo precedente influyó en el número de vainas m⁻² en los años 2000, 2001 y 2002 sin que hubiera una relación clara entre las dosis de N fertilizante y el número de vainas m⁻² (Figura 8).

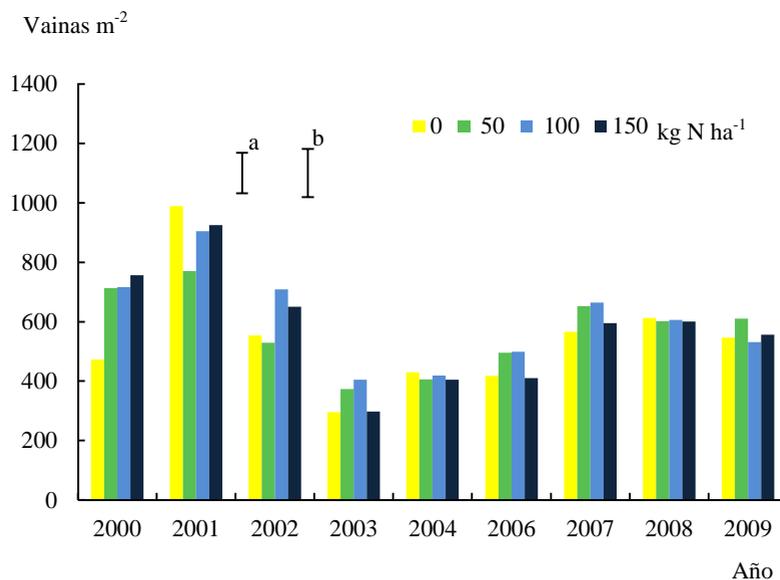


Figura 8. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el número de vainas m⁻² del cultivo del garbanzo. a y b representan niveles de significación al 95 % (P≤0.05) para la comparación de medias del mismo y de distinto año, respectivamente.

- Peso de los 1000 granos

El peso de los 1000 granos fue significativo tanto para el año como para la interacción año x laboreo (Tabla 7). El peso de los 1000 granos medio fue de 260 g, variando entre 197 y 314 g en los años 2003 y 2007, respectivamente. En cuanto a la interacción año x laboreo en el 2000 y 2003 el NL tuvo mayor peso de los 1000 granos que el LC sin que hubiera diferencias para el resto de años (Figura 9).

Peso de los 1000 granos (g)

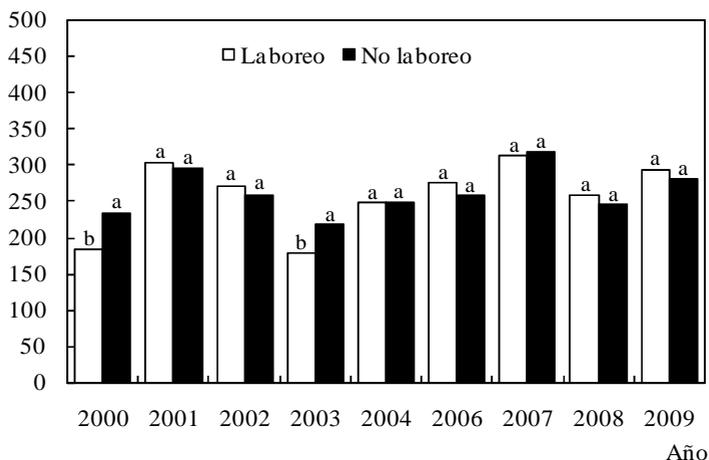


Figura 9. Efecto del año x laboreo en el peso de los 1000 granos del cultivo del garbanzo. Dentro de cada año las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

4.2.4. ÍNDICE DE COSECHA (HI)

El índice de cosecha (HI) estuvo influenciado por el año, año x sistema de laboreo y por la interacción año x dosis de N fertilizante (Tabla 7). El HI medio fue del 40 %, variando entre 23 y 49 % en los años 2000 y 2007, respectivamente. En la interacción año x laboreo, el LC mejoró al NL en los años 2002 y 2006 y el NL mejoró sólo en un año (2003), sin diferencias en el resto de los años (Figura 10).

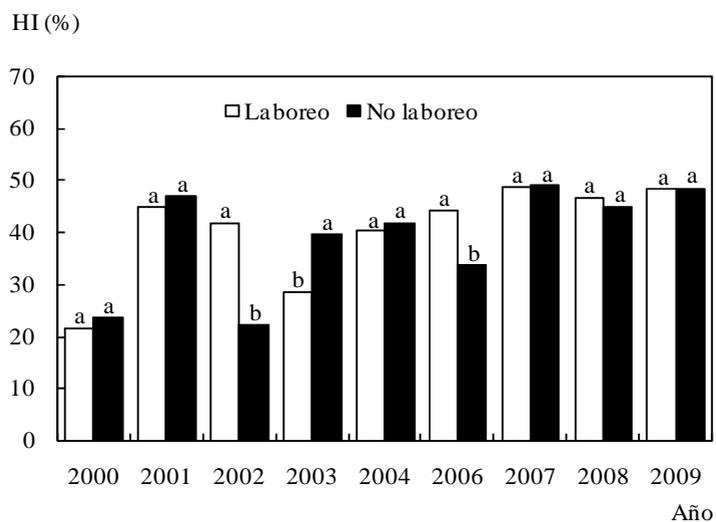


Figura 10. Efecto del año x laboreo en el índice de cosecha (HI) del cultivo del garbanzo. Dentro de cada año las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

En cuanto a la interacción año x dosis de N fertilizante, sólo los años 2000, 2002, 2003 y 2009 mostraron diferencias sin que quedara clara que a mayor dosis de N fertilizante hubiera mayor HI (Figura 11).

Esto podría estar relacionado con una mayor salinidad en el suelo que le impediría a la planta extraer todos los nutrientes. López-Bellido *et al.* (2013) observaron un aumento en el contenido de N en el perfil en función de la dosis de N aplicado.

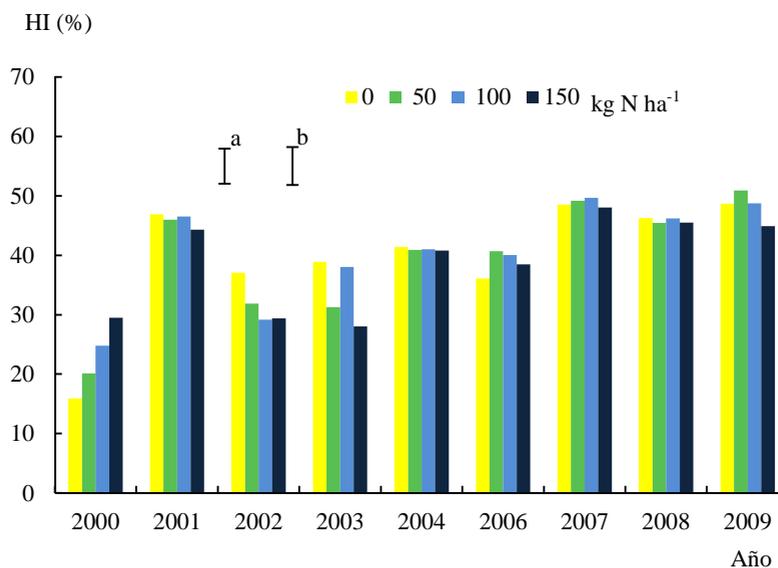


Figura 11. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el índice de cosecha (HI) del cultivo del garbanzo. Dentro de cada año las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

4.2.5. EFICIENCIA EN EL USO DE LA PRECIPITACIÓN (PUE)

En los 9 años de estudio, la PUE fue significativa para el año y para la interacción año x laboreo, sin significación para el resto de fuentes de variación (Tabla 8). El año ejerció una fuerte influencia sobre la PUE que varió entre 2 kg ha⁻¹ mm⁻¹ en el año 2000 y 10.3 kg ha⁻¹ mm⁻¹ en el 2007 (datos no mostrados).

El NT registró valores de PUE significativamente más altos que el LC en los años 2003 y 2007 mientras que en el año 2006 el resultado fue al contrario (Figura 12). A pesar de que las precipitaciones en ambos años fueron similares (2006 y 2007), estas diferencias en la PUE con respecto al sistema de laboreo en estos años, se debió a la pérdida de rendimiento del NL en el año 2006 causado, como se ha indicado anteriormente, por *Ascochyta blight*, lo que ocasionó una baja PUE respecto al LC.

Tabla 8. Efecto significativo del año, sistema de laboreo y dosis de N fertilizante en la eficiencia en el uso de la precipitación (PUE), uso del agua (WU) y eficiencia en el uso del agua (WUE) en el cultivo de garbanzo durante 9 años.

Tratamiento	PUE (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)	WU (mm)	WUE (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)
Año(A)	***	***	***
S. laboreo (L)	ns	***	ns
A*L	***	***	***
Nitrógeno (N)	ns	ns	*
A*N	ns	ns	ns
L*N	ns	ns	ns
A*L*N	ns	ns	ns

* Significativa para 0.05 de nivel de probabilidad.

** Significativa para 0.01 de nivel de probabilidad.

*** Significativa para 0.001 de nivel de probabilidad.

†ns, no significativo.

PUE (kg ha⁻¹ mm⁻¹)

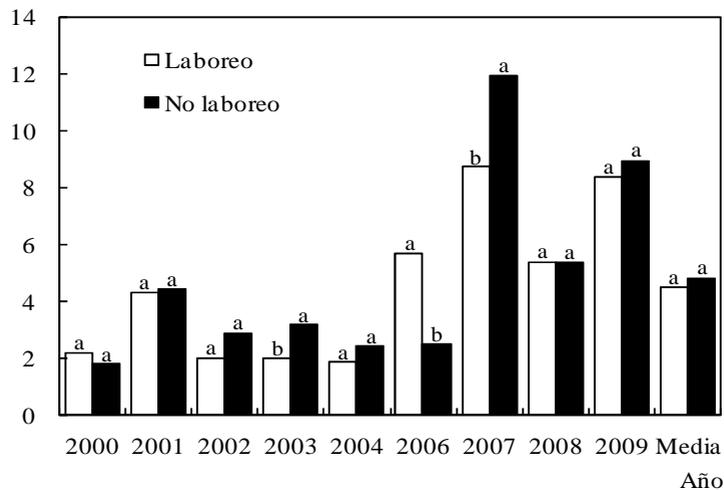


Figura 12. Efecto del año x laboreo en la eficiencia en el uso de la precipitación (PUE) del cultivo del garbanzo. Dentro de cada año las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

4.2.6. USO DEL AGUA (WU)

El WU fue altamente significativo sólo para el año, el sistema de laboreo y en la interacción año x laboreo (Tabla 8). El WU varió entre 185 mm en el año 2006 y 554 mm en el 2001. En el conjunto de los años se registraron valores de WU de 375 mm y 355 mm para el NT y LC, respectivamente. El NL registró mayores valores de WU que el LC en 5 de los 9 años de estudio, no existiendo diferencias significativas entre ambos sistemas de laboreo en los demás años (Figura 13). Este mayor WU en el NL podría estar relacionado con un mayor número de nódulos de *Rhizobium* en las raíces de la planta. López-Bellido *et al.* (2011), en un estudio realizado en el mismo experimento obtuvieron un claro efecto positivo del NL sobre la biomasa nodular y el nitrógeno biológicamente fijado.

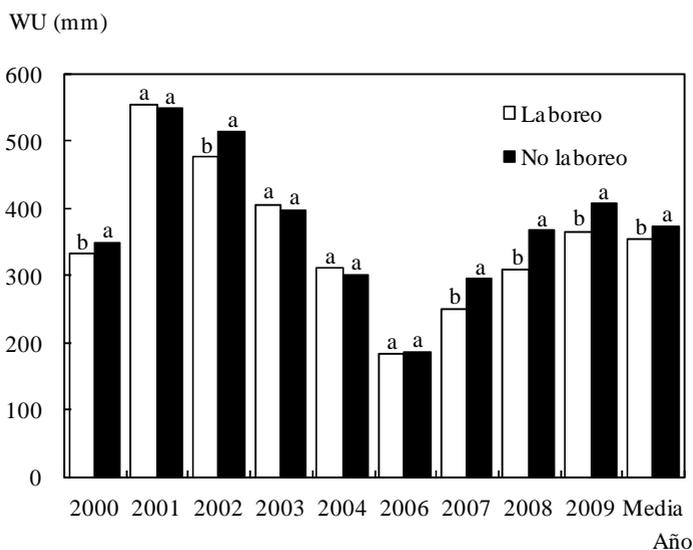


Figura 13. Efecto del año x laboreo en el uso del agua (WU) del cultivo del garbanzo. Dentro de cada año las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

En este sentido, un mayor contenido de agua en siembra en el NL podría favorecer la simbiosis entre el *Rhizobium* y la leguminosa. Ben Romdhane *et al.* (2009), mostraron que el número de nódulos y el crecimiento de las plantas se ven afectados por el déficit hídrico.

4.2.7. EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA (WUE)

La WUE fue significativa en el año, en la interacción año x laboreo y en la dosis de N fertilizante aplicado al cultivo precedente (Tabla 8). Los valores de la WUE difirieron considerablemente en el periodo estudiado, y estuvieron comprendidos entre 1.8 kg ha⁻¹ mm⁻¹ en el año 2003 y 5.9 kg ha⁻¹ mm⁻¹ en el 2007 (datos no mostrados). El NL registró valores de WUE más altos que el LC en 2 de los 9 años (2003 y 2007) y el LC sólo en el 2006 (Figura 14). Por lo tanto, no se puede afirmar claramente que en los años secos un sistema de laboreo sea más eficiente que otro. Estos resultados difirieron de los obtenidos por Gan *et al.* (2010), que obtuvieron mayor WUE en el sistema del LC que en el del NL en condiciones de alto estrés hídrico. La dosis de N fertilizante aplicada al cultivo precedente influyó sobre la WUE existiendo una diferencia clara entre la dosis 0 kg N ha⁻¹ y las dos dosis de N más altas con unos valores medios de 3.03, 3.31 y 3.28 kg ha⁻¹ mm⁻¹, respectivamente (datos no mostrados). Estos valores parecen indicar que hay respuesta a la aplicación de N fertilizante al cultivo precedente así como una dosis mayor de N fertilizante puede afectar a la fijación de N₂ negativamente, por un exceso de nitratos en el suelo. López-Bellido *et al.* (2004) observaron dentro del mismo experimento que la frecuencia de años secos no tiene respuesta sobre los rendimientos del trigo, provocando un aumento en la cantidad de N residual en el suelo y afectando a los rendimientos del garbanzo.

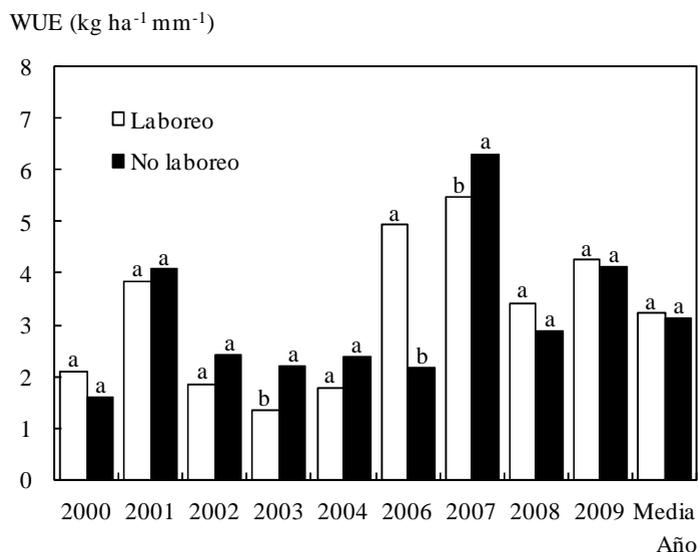


Figura 14. Efecto del año x laboreo en la eficiencia en el uso del agua del cultivo del garbanzo. Dentro de cada año las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

4.3. GIRASOL

4.3.1. CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO (CAS)

La diferencia de precipitación registrada a lo largo de los años de estudio ejerció una fuerte influencia en el contenido de agua en el suelo (CAS) y en las profundidades de suelo estudiadas tanto en la siembra como en la cosecha (Tabla 9). El CAS difirió significativamente entre los sistemas de laboreo sólo en la profundidad 0-30 cm de siembra mientras en la interacción año x laboreo fue significativa en las profundidades 0-30 cm de siembra y 60-90 cm de cosecha. La dosis de N fertilizante aplicado al cultivo precedente sólo mostró diferencias significativas en las profundidades 0-30 cm y 60-90 cm, ambas en cosecha. En la interacción año x dosis de N fertilizante, el CAS fue significativo en 60-90 cm de siembra y en 0-30 cm de cosecha. Sin embargo, en la interacción laboreo x dosis

de N fertilizante el CAS mostró diferencias significativas en 30-60 cm de siembra y en 0-30 cm en cosecha. Por último, la interacción año x laboreo x dosis de N fertilizante sólo mostró diferencias significativas en el CAS en 0-30 cm de siembra.

Tabla 9. Efecto significativo del año, sistema de laboreo y dosis de N fertilizante en el contenido de agua en el suelo del cultivo de girasol durante 9 años.

Tratamiento	Contenido de agua en el suelo					
	Profundidad en siembra (cm)			Profundidad en cosecha (cm)		
	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90
Año(A)	***	***	***	***	***	***
S. laboreo (L)	***	ns	ns	ns	ns	ns
A*L	***	ns	ns	ns	ns	*
Nitrógeno (N)	ns†	ns	ns	**	ns	*
A*N	ns	ns	*	**	ns	ns
L*N	ns	*	ns	*	ns	ns
A*L*N	*	ns	ns	ns	ns	ns

* Significativa para 0.05 de nivel de probabilidad.

** Significativa para 0.01 de nivel de probabilidad.

*** Significativa para 0.001 de nivel de probabilidad.

†ns, no significativo.

- Siembra

En el perfil 0-30 cm, el CAS varió entre $32.7 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y $41.7 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en los años 2006 y 2004 coincidiendo con un año seco y lluvioso respectivamente sin que hubiera relación con la precipitación anual recibida. En cuanto a la influencia del sistema de laboreo de esta misma profundidad, el CAS fue mayor en el NL que en el LC ($37.8 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y $36.1 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente). El NL tiene mayor capacidad de almacenar agua que el LC. En este sentido numerosos trabajos aportan los beneficios del NL y del laboreo de conservación frente al LC (Anderson *et al.*, 1999; McGee *et al.*, 1997; Tanaca and

Anderson, 1997). Sin embargo, el CAS sólo fue mayor en el NL en los años 2006 y 2007 coincidiendo estos años con dos de los 3 años más secos sin que hubiera diferencias en el resto de los años (Figura 15).

En el perfil 30-60 cm, el CAS varió entre $26.5 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y $44.7 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en los años 2002 y 2004, respectivamente. Según Aboudrare *et al.* (2006), la variabilidad entre años en el CAS a principios de primavera era mucho mayor que las diferencias entre los métodos de laboreo en el suelo. En la interacción laboreo x dosis de N fertilizante no pudo establecerse relación entre los dos tratamientos, solamente en el NL se diferenció claramente entre la dosis 0 y 150 kg N ha^{-1} (datos no mostrados).

CAS ($\times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$)

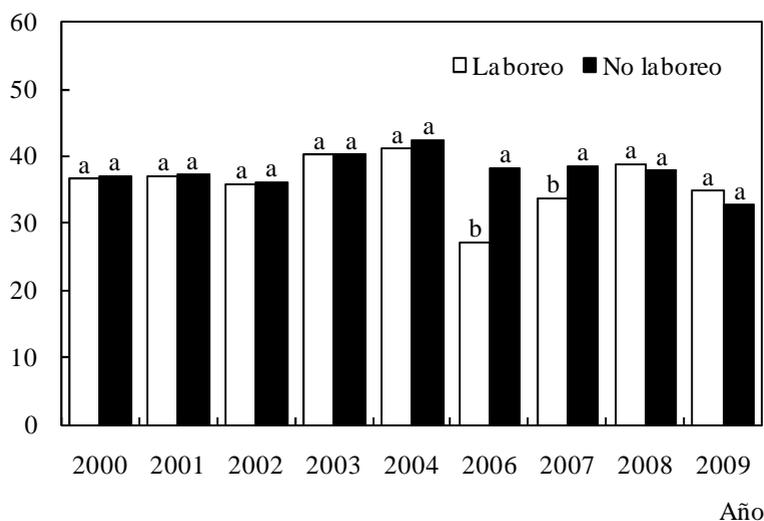


Figura 15. Efecto del año x laboreo en el contenido de agua en el suelo (CAS) en el perfil 0-30 cm de siembra en el cultivo del girasol. Dentro de cada año las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

El CAS en el perfil 60-90 cm registró valores entre $29.3 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y $44.9 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en los años 2004 y 2008, respectivamente. En la interacción año

x dosis de N fertilizante, sólo los años 2002 y 2008 mostraron diferencias significativas siendo en ambos años la dosis 50 kg N ha⁻¹ la de menor CAS pero difiriendo con respecto a la de mayor CAS (Figura 16).

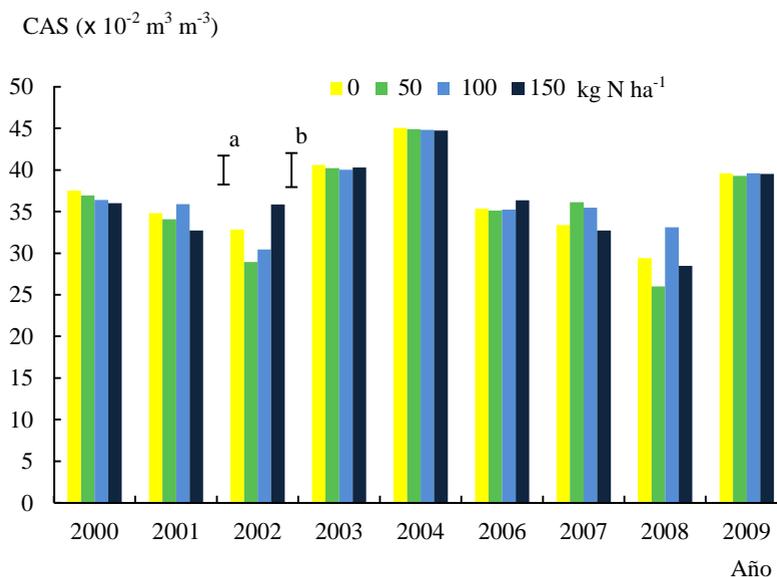


Figura 16. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el contenido de agua en el suelo (CAS) en el perfil 60-90 cm de siembra en el cultivo de girasol. a y b representan niveles de significación al 95 % ($P \leq 0.05$) para la comparación de medias del mismo y de distinto año, respectivamente.

- Cosecha

El CAS registrado en el perfil 0-30 cm varió entre $3 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y $12.2 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en los años 2003 y 2000, respectivamente. El CAS fue menor en la dosis 0 kg N ha⁻¹ y mayor en las dos dosis de N fertilizante más altas. En la interacción año x dosis de N fertilizante sólo hubo diferencias entre las dosis de N fertilizante en los años 2000 y 2001, siendo la dosis 0 kg N ha⁻¹ fertilizante la que menor CAS obtuvo y sucediendo lo contrario con las dosis más altas de N fertilizante (Figura 17).

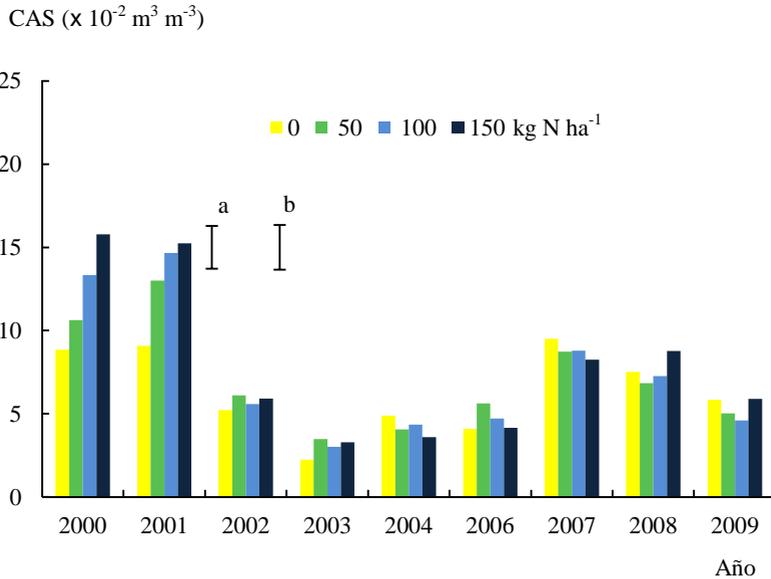


Figura 17. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el contenido de agua en el suelo (CAS) en el perfil 0-30 cm de cosecha en el cultivo de girasol. a y b representan niveles de significación al 95 % ($P \leq 0.05$) para la comparación de medias del mismo y de distinto año, respectivamente.

El CAS en la interacción laboreo x dosis de N fertilizante no mostró una clara diferencia entre los sistemas de laboreo pero sí hubo diferencias entre la dosis más alta y el resto de dosis de N fertilizante en el LC mientras que en el NL la diferencia estuvo entre la dosis 0 y 50 kg N ha⁻¹ (Figura 18).

Los datos de CAS en el perfil 30-60 cm variaron entre $12.1 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y $29.8 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en los años 2002 y 2004, respectivamente. El que no hubiera más diferencias con el resto de variables estudiadas posiblemente esté relacionado con el sistema radicular de este cultivo ya que cuando se toman las medidas del CAS, prácticamente en este perfil la planta ha absorbido todo lo que el sistema le permite extraer en ambos sistemas de laboreo, por lo que el sistema radicular sigue profundizando en el suelo. Rachidi *et al.* (1993) en un estudio realizado sobre el girasol y el sorgo encontraron que el girasol agotaba más agua en el suelo a una mayor profundidad, llegando a alcanzar una profundidad de 2.70 m.

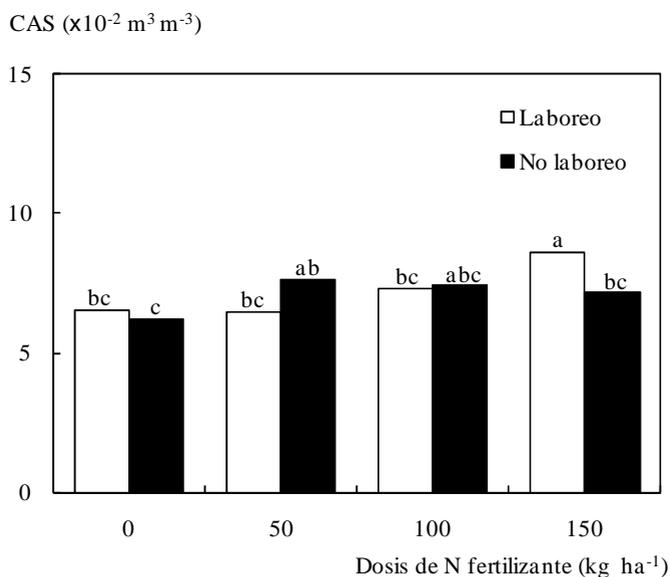


Figura 18. Efecto del laboreo x la dosis de N fertilizante en el contenido de agua en el suelo (CAS) en el perfil 0-30 cm de cosecha del cultivo de girasol. Las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$) en los distintos sistemas de laboreo.

En el perfil 60-90 cm el CAS varió entre $18.4 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y $38.4 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en los años 2008 y 2004, respectivamente. El CAS en el NL fue mayor que en el LC en el año 2002 siendo un año lluvioso mientras que sucedió lo contrario en el año 2000 con una precipitación normal (Figura 19). En cuanto a la dosis de N fertilizante, la dosis 0 kg N ha^{-1} fue claramente la que menor valor obtuvo en el CAS respecto a las demás dosis de N fertilizante.

CAS ($\times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$)

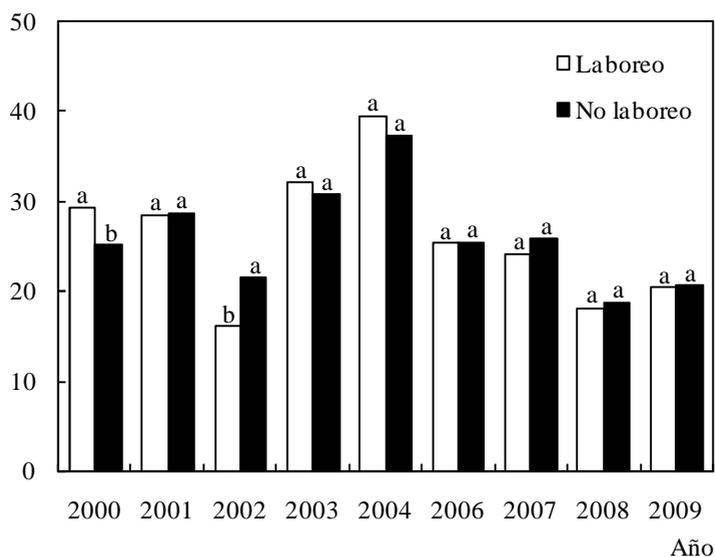


Figura 19. Efecto del año x laboreo en el contenido de agua en el suelo (CAS) en el perfil 60-90 cm de cosecha del cultivo de girasol. Dentro de cada año las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

El mayor CAS en las dosis más altas de nitrógeno podría estar relacionado con un mayor desarrollo vegetativo que a la vez protegería al suelo de la evaporación. Según Aboudrare *et al.* (2006), una rápida cubierta cerrada rápidamente sería recomendable para limitar la evaporación en áreas de secano, para lo cual no debería ser obtenida por un alto índice de área foliar (LAI) en girasol sino a través de la orientación y fisiología del cultivo.

4.3.2. RENDIMIENTO DE GRANO

El rendimiento de grano fue significativo en el año, año x laboreo y año x dosis de N fertilizante (Tabla 10). Las variaciones así como la distribución de lluvia a lo largo de los años influyeron en los rendimientos obtenidos. Estos

variaron entre 2521 kg ha⁻¹ y 269 kg ha⁻¹ en los años 2000 y 2006, respectivamente coincidiendo el de menor rendimiento obtenido con un año seco.

Tabla 10. Efecto significativo del año, sistema de laboreo y dosis de N fertilizante en el rendimiento de grano (kg ha⁻¹), número de granos vaina⁻¹, vainas m⁻², peso de los 1000 granos (g) e índice de cosecha (HI) en el cultivo de girasol durante 9 años.

Tratamiento	Rendimiento grano	Granos capitulos ⁻¹	Capítulos m ⁻²	Peso 1000 granos	HI
Año(A)	***	***	***	***	***
S. Laboreo (L)	ns	*	ns	ns	ns
A*L	**	**	ns	ns	ns
Nitrógeno (N)	ns	ns	ns	ns	***
A*N	**	*	ns	ns	***
L*N	ns	ns	ns	ns	ns
A*L*N	ns	ns	ns	ns	**

* Significativa para 0.05 de nivel de probabilidad.

** Significativa para 0.01 de nivel de probabilidad.

*** Significativa para 0.001 de nivel de probabilidad.

†ns, no significativo.

El rendimiento de grano no estuvo relacionado con la precipitación recibida. Según Aboudrare *et al.* (2006), la humedad de la capa superior del suelo es la que regula el establecimiento de las plántulas y la que limita el rendimiento del girasol más que el CAS total en siembra.

El rendimiento de girasol seguramente esté relacionado con las lluvias recibidas en fases claves como la formación del botón floral, la floración... Göksoy *et al.* (2004) indicaron en un estudio realizado sobre el riego en el cultivo de girasol que los rendimientos aumentarían si este se riega en etapas claves del desarrollo del cultivo. El NL obtuvo mayor rendimiento de grano que el LC en 2 de los 9 años (2008 y 2009) y el LC también mejoró al NL en los años 2001 y 2002, siendo estos dos años lluviosos (Figura 20). Sin *et al.* (2000) mostraron que los bajos rendimientos en el NL fueron debidos a una reducción de la porosidad del suelo.

Rendimiento de grano (kg ha⁻¹)

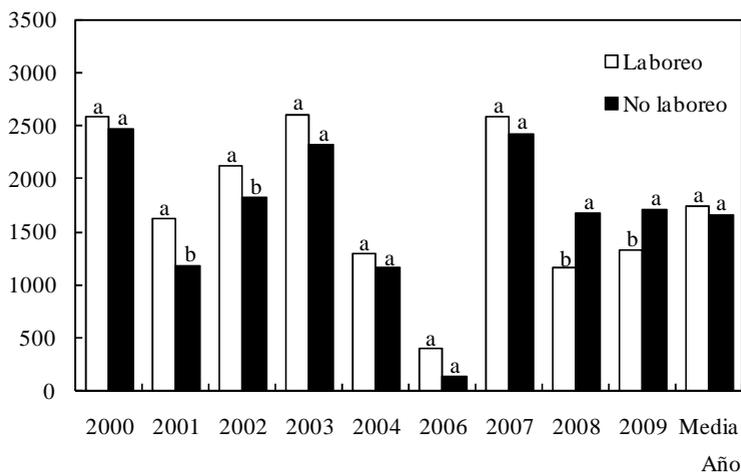


Figura 20. Efecto del año x laboreo en el rendimiento de grano del cultivo de girasol. Dentro de cada año las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

La dosis de N fertilizante sólo influyó en el rendimiento de grano en los años 2002 y 2009 (Figura 21). En el año 2002, la dosis 0 kg ha⁻¹ de N fertilizante fue la que menor rendimiento de grano obtuvo respecto a las demás dosis de N fertilizante que no tuvieron diferencias significativas entre ellas. En cambio, en el año 2009 la dosis 0 kg N ha⁻¹ fue la que mayor rendimiento de grano obtuvo sin diferencias significativas entre el resto de dosis de N fertilizante. La dosis de N aportada al cultivo precedente podría ser limitante en el rendimiento de grano si la precipitación recibida excede de la media de la zona. Moroke *et al.* (2011) señalaron que el nitrógeno puede llegar a ser limitante para el rendimiento del sorgo en secano si la precipitación excede del rendimiento medio.

Rendimiento de grano (kg ha⁻¹)

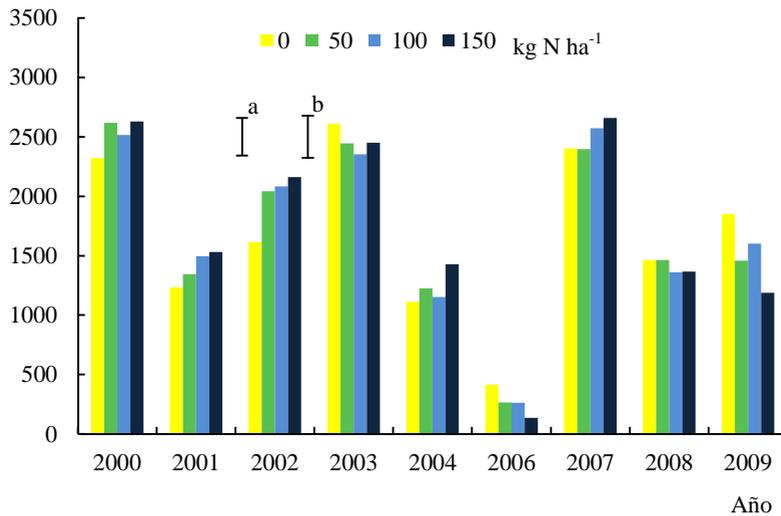


Figura 21. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el rendimiento del grano del cultivo de girasol. a y b representan niveles de significación al 95 % ($P \leq 0.05$) para la comparación de medias del mismo y de distinto año, respectivamente.

4.3.3. COMPONENTES DE RENDIMIENTO

- Granos capítulo⁻¹

El número de granos capítulo⁻¹ fue significativo en el año, sistema de laboreo y las interacciones año x laboreo y año x dosis de N fertilizante (Tabla 10). La precipitación a lo largo de los años influyó en el número de granos capítulo⁻¹, obteniéndose valores entre 1007 y 170 en los años 2000 y 2006 respectivamente, coincidiendo este último con un año seco. Sin embargo, el mayor número de granos capítulo⁻¹ se observó en un año de precipitación normal. En el conjunto de los años, el NL registró mayor número de granos capítulo⁻¹ que el LC, obteniéndose valores de 628 y 582, respectivamente (Figura 22). Estos resultados difieren de los obtenidos por López-Bellido *et al.* (2002).

Granos capítulo⁻¹

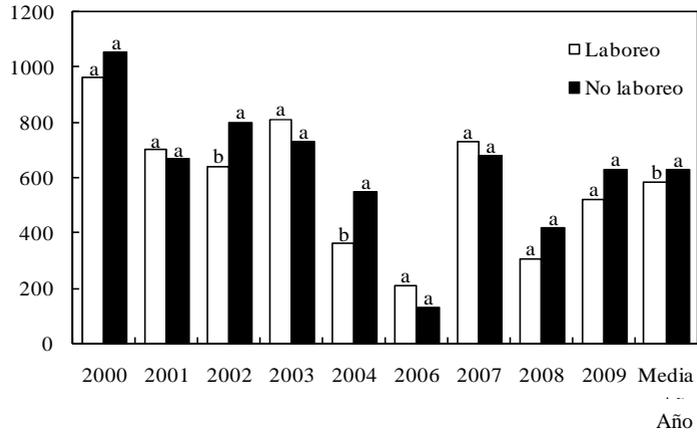


Figura 22. Efecto del año x laboreo en el número de granos capítulo⁻¹ en el cultivo de girasol. Dentro de cada año las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

El NL registró mayor número de granos capítulo⁻¹ en los años 2002 y 2004, siendo ambos años lluviosos sin que hubiera diferencia con el resto de años (Figura 23). En la interacción año x dosis de N fertilizante sólo mostraron diferencias los años 2001 y 2003 sin que hubiera una diferencia clara entre las dosis de N fertilizante y el número de granos capítulo⁻¹. Sólo en el año 2001, la dosis 0 kg N ha⁻¹ fue la que menor número de granos capítulo⁻¹ obtuvo respecto a las demás dosis de N fertilizante (Figura 23).

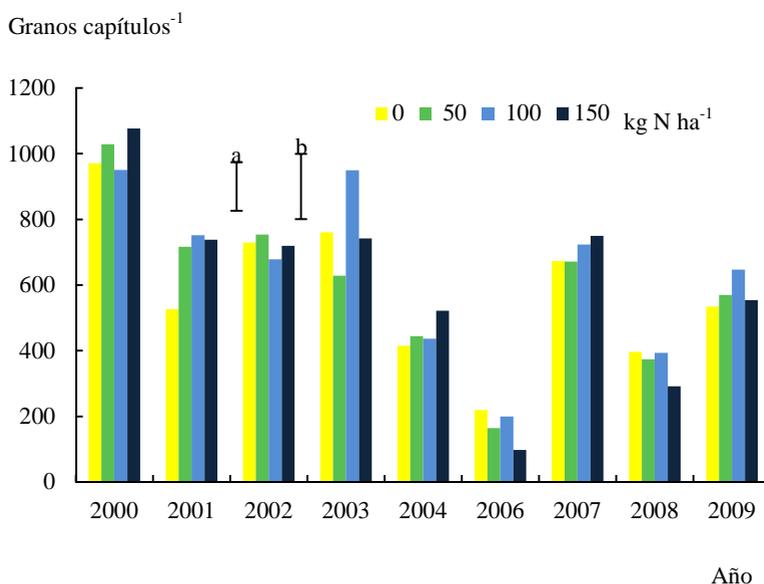


Figura 23. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el número de granos capítulos⁻¹ del cultivo de girasol. a y b representan niveles de significación al 95 % ($P \leq 0.05$) para la comparación de medias del mismo y de distinto año, respectivamente.

- Capítulos m⁻²

Los capítulos m⁻² sólo fueron significativos para el año (Tabla 10). Estos variaron entre 10 capítulos m⁻² en los años 2008 y 2004 y 5 capítulos m⁻² en el año 2000 sin ninguna relación con la precipitación recibida.

- Peso de los 1000 granos

El peso de los 1000 granos sólo mostró diferencias significativas en el año (Tabla 10), cuyos valores variaron entre 54 g en el 2002 y 27 g en el año 2006. En estos años coincidió la precipitación anual registrada con el mayor y menor peso obtenido.

4.3.4. ÍNDICE DE COSECHA (HI)

El HI mostró diferencias significativas en el año, en la dosis de N fertilizante y en las interacciones año x dosis de N fertilizante y en el año x laboreo x dosis de N fertilizante (Tabla 10). La diferente precipitación recibida influyó en los años de estudio. Estos variaron entre 39.6 % y 11.4 % en los años 2004 y 2006 coincidiendo con el año más lluvioso y seco, respectivamente.

La dosis de N fertilizante aplicado al cultivo precedente influyó en el HI siendo la dosis 0 kg N ha⁻¹ la que mayor % de HI obtuvo y la que menor fue la dosis 150 kg N ha⁻¹. Sin embargo, no queda claro que si se aumenta la dosis de N fertilizante, el HI disminuya (Figura 24). En la interacción año x dosis de N fertilizante sólo se encontraron diferencias en los años 2003, 2006 y 2008 manteniéndose que el mayor % de HI estuvo en la dosis 0 kg N ha⁻¹, sin embargo el menor % de HI en la dosis 150 kg N ha⁻¹ no se mantuvo en el 2003 (Figura 26).

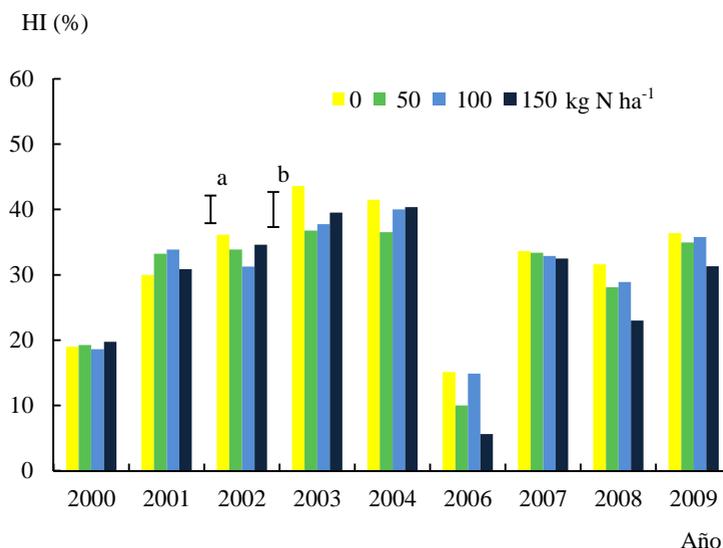


Figura 24. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el índice de cosecha (HI) del cultivo de girasol. a y b representan niveles de significación al 95 % ($P \leq 0.05$) para la comparación de medias del mismo y de distinto año, respectivamente.

4.3.5. EFICIENCIA EN EL USO DE LA PRECIPITACIÓN (PUE)

A pesar de que el HI mostró diferencias en los años 2002, 2003, 2004, 2006 y 2008 no queda clara la relación entre los años, el sistema de laboreo y la dosis de N fertilizante.

La PUE en los 9 años fue significativa en el año, en el sistema de laboreo y en las interacciones año x laboreo y en el año x dosis de N fertilizante (Tabla 11).

Tabla 11. Efecto significativo del año, sistema de laboreo y dosis de N fertilizante en la eficiencia en el uso de la precipitación (PUE), uso del agua (WU) y eficiencia en el uso del agua (WUE) en el cultivo de girasol durante 9 años.

Tratamiento	PUE (kg ha⁻¹ mm⁻¹)	WU (mm)	WUE (kg ha⁻¹ mm⁻¹)
Año(A)	***	***	***
S. laboreo (L)	**	ns	*
A*L	***	ns	ns
Nitrógeno (N)	ns	ns	ns
A*N	*	ns	*
L*N	ns	ns	ns
A*L*N	ns	ns	*

* Significativa para 0.05 de nivel de probabilidad.

** Significativa para 0.01 de nivel de probabilidad.

*** Significativa para 0.001 de nivel de probabilidad.

†ns, no significativo.

El año ejerció una fuerte influencia sobre la PUE, variando entre 23.2 kg ha⁻¹ mm⁻¹ en el año 2003 y 1.7 kg ha⁻¹ mm⁻¹ en el año 2006. Moroke *et al.* (2011) consideraron que el girasol no es un candidato apropiado en la intensificación de cultivos en las regiones semiáridas debido a que no siempre utiliza eficientemente la precipitación en la estación de crecimiento y a que además agota el agua disponible para los cultivos siguientes. En el conjunto de los años, el sistema de laboreo influyó sobre la PUE, siendo mayor en el LC que en el NL (11.4 y 10.4 kg ha⁻¹ mm⁻¹, respectivamente). El LC mejoró al NL en la PUE en los años 2001 y 2003 siendo ambos lluviosos y el NL mejoró al LC en los años 2008 y 2009

siendo uno seco y el otro dentro de la precipitación media anual de la zona (Figura 25).

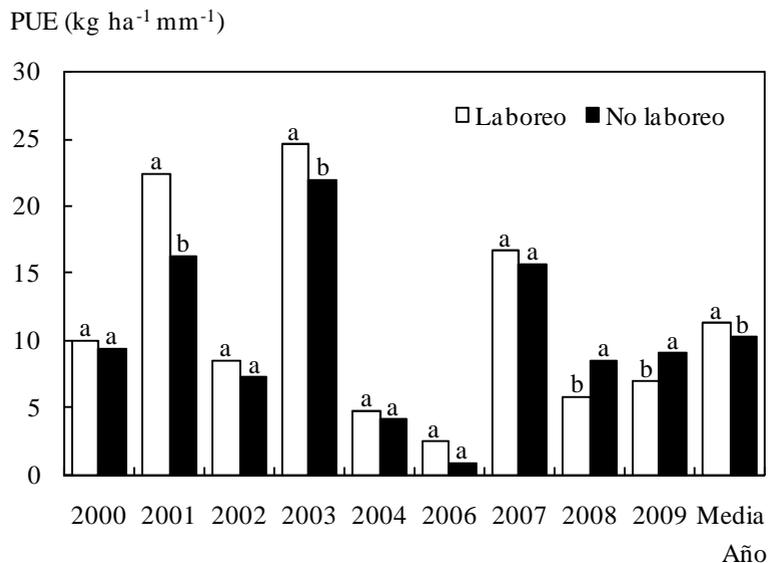


Figura 25. Efecto del año x laboreo en la eficiencia en el uso de la precipitación (PUE) del cultivo del girasol. Dentro de cada año las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

En la interacción año x dosis de N fertilizante se encontraron diferencias en los años 2001, 2003, 2009 y en dos de estos años se mantuvo que la dosis 0 kg N ha^{-1} fue la que mayor valor de PUE obtuvo respecto a las demás dosis de N fertilizante (Figura 26).

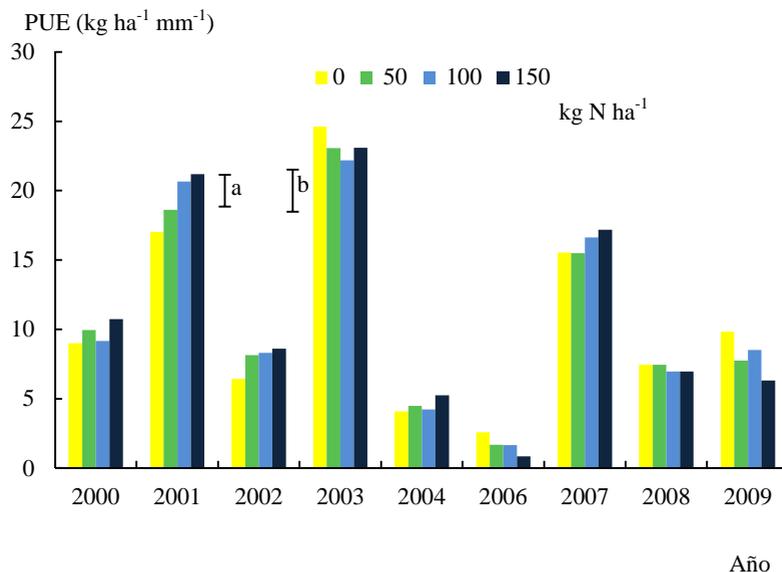


Figura 26. Efecto del año x dosis de N fertilizante en la eficiencia en el uso de la precipitación (PUE) del cultivo del girasol. a y b representan niveles de significación al 95 % ($P \leq 0.05$) para la comparación de medias del mismo y de distinto año, respectivamente.

4.3.6. USO DEL AGUA (WU)

El uso del agua sólo tuvo diferencias significativas en el año (Tabla 11). El WU estuvo fuertemente influenciado por la variación de la lluvia a lo largo de los años. Este varió entre 450 mm en el 2004 y 176 mm en el año 2001, siendo ambos años lluviosos. Según Aboudrare *et al.* (2006), el agua almacenada en siembra tuvo una gran influencia sobre el uso de agua especialmente con precipitación estacional limitada. El WU no estuvo relacionado con el rendimiento de grano obtenido. Autores como López-Bellido *et al.* (2007b) en un estudio realizado sobre el trigo con distintas rotaciones sugirieron que el WU estuvo relacionado con la biomasa obtenida y reflejó el crecimiento desigual en algunos años.

4.3.7. EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA (WUE)

La WUE fue significativa en el año, sistema de laboreo y en las interacciones año x dosis de N fertilizante y año x laboreo x dosis de N fertilizante (Tabla 11). La precipitación recibida a lo largo de los años influyó sobre la WUE obtenida, variando los datos entre 9 y 0.9 kg ha⁻¹ mm⁻¹ en los años 2001 y 2006, respectivamente. En el conjunto de los años, el sistema de laboreo influyó en la WUE siendo el LC superior al NL (5.6 kg ha⁻¹ mm⁻¹ frente a 5.1 kg ha⁻¹ mm⁻¹). Estos datos difirieron de los obtenidos por Wang *et al.* (2011) los cuales obtuvieron mejor WUE en el NL comparado con el LC en un estudio realizado sobre el cultivo de maíz. Los resultados podrían estar relacionados con el tamaño de los poros del suelo. Hill (1990) indicó una mejora del LC con respecto al NL relacionado con el mayor tamaño de poro disponible, el cual, mejora el almacenaje y disponibilidad de agua en el suelo debido a una mayor infiltración y más baja evaporación del agua en el suelo. En la interacción año x dosis de N fertilizante, la WUE sólo varió en los años 2000, 2001 y 2009 sin diferencias significativas para el resto de los años (Figura 27). En los años 2000 y 2001 la dosis 0 kg N ha⁻¹ fue la que menor valor de WUE obtuvo, diferenciándose claramente de la dosis 150 de kg N ha⁻¹. En el 2009 sin embargo, sucedió todo lo contrario que en los dos años anteriores.

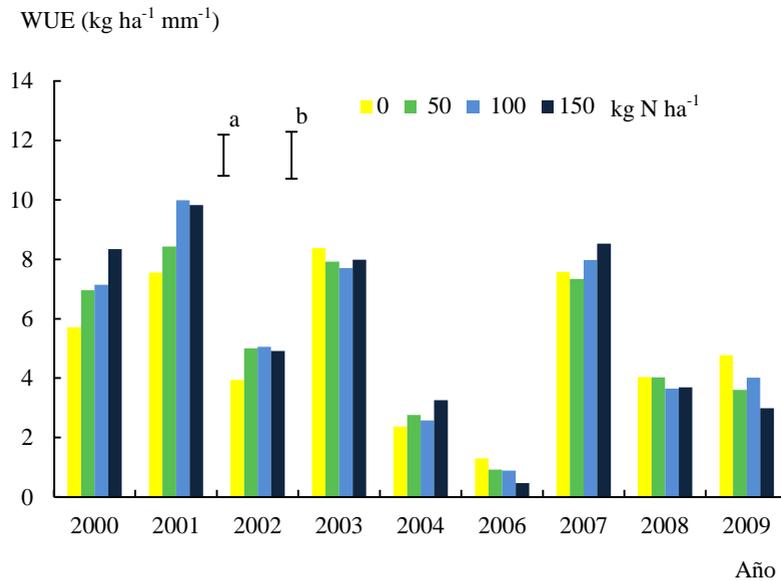


Figura 27. Efecto del año x dosis de N fertilizante en la eficiencia en el uso del agua (WUE) del cultivo del girasol. a y b representan niveles de significación al 95 % ($P < 0.05$) para la comparación de medias del mismo y de distinto año, respectivamente.

4.4. HABAS

4.4.1. CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO (CAS)

La precipitación registrada en los años de estudio tuvo un efecto marcado sobre el CAS. En general, el CAS presentó más valores significativos en siembra que en cosecha para cada uno de los intervalos de profundidad estudiados (Tabla 12).

Tabla 12. Efecto significativo del año, sistema de laboreo y dosis de N fertilizante en el contenido de agua del suelo en el cultivo de las habas durante 8 años.

Tratamiento	Contenido de agua en el suelo					
	Profundidad en siembra (cm)			Profundidad en cosecha (cm)		
	0-30	30-60	60-90	0-30	30-60	60-90
Año(A)	***	***	***	***	***	***
S. laboreo (L)	**	***	**	ns	ns	*
A*L	**	***	***	ns	**	ns
Nitrógeno (N)	ns†	**	***	ns	ns	ns
A*N	ns	*	*	ns	*	ns
L*N	ns	ns	ns	ns	*	ns
A*L*N	ns	ns	ns	*	**	ns

* Significativa para 0.05 de nivel de probabilidad.

** Significativa para 0.01 de nivel de probabilidad.

*** Significativa para 0.001 de nivel de probabilidad.

†ns, no significativo.

El sistema de laboreo ejerció un efecto significativo en el CAS en siembra de todas las profundidades estudiadas y en 60-90 cm en cosecha. El CAS en la interacción año x laboreo difirió para todos los perfiles de siembra y en el perfil 30-60 cm de cosecha. La dosis de N fertilizante fue significativa sólo en siembra en los perfiles 30-60 cm y 60-90 cm. La interacción año x dosis de N fertilizante fue significativa en el CAS en los perfiles 30-60 cm y 60-90 cm en siembra y sólo en 30-60 cm en cosecha. Por último, el CAS en la interacción año x laboreo x dosis de N fertilizante fue significativa en los perfiles 0-30 cm y 30-60 cm de cosecha.

- Siembra

En el horizonte 0-30 cm, el CAS varió entre $29.9 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y $41 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en los años 2006 y 2004 coincidiendo con un año seco y lluvioso, respectivamente. En el perfil 30-60 cm, el CAS varió entre $12 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y $36 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en los años 2006 y 2003, respectivamente y en la última profundidad (60-90 cm) varió entre $29.1 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el año 2007 y $36.3 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el año 2004. En el conjunto de los años, el NL mejoró al LC en todos los perfiles

estudiados en el CAS mientras que en la interacción año x laboreo en el perfil 0-30 cm, el NL mejoró al LC en los años 2006 y 2009 (Figura 28).

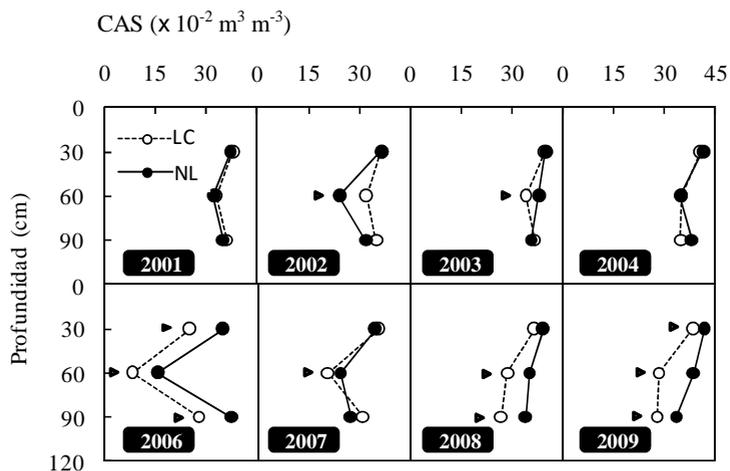


Figura 28. Contenido de agua en el suelo (CAS) en siembra del cultivo de habas influenciado por el año y sistema de laboreo (LC: laboreo convencional; NL: no laboreo) según la profundidad de suelo. El triángulo (▶) representa diferencias significativas entre sistemas de laboreo.

En el perfil 30-60 cm el NL mejoró al LC en 4 de los 8 años (2006, 2007, 2008 y 2009) y el LC mejoró al NL en el año 2002. En el perfil 60-90 cm, el NL mejoró al LC en los años 2006, 2008 y 2009 sin diferencias significativas entre los dos sistemas de laboreo en los demás años. El NL mejora la capacidad de almacenamiento del suelo debido a una mayor infiltración causada por la mejora de la estructura del suelo (Muñoz-Romero *et al.*, 2011).

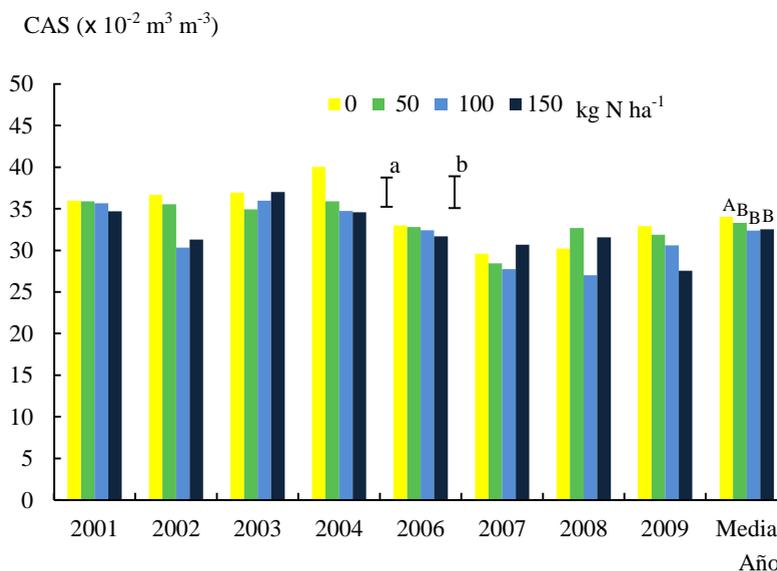


Figura 29. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el contenido de agua en el suelo (CAS) en el perfil 30-60 cm de siembra en el cultivo de las habas. a y b representan niveles de significación al 95 % ($P \leq 0.05$) para la comparación de medias del mismo y de distinto año, respectivamente. Letras en mayúscula en la media representan la existencia de diferencias significativas a $P \leq 0.05$ de acuerdo con la MDS.

En la profundidad 30-60 cm, la dosis de N fertilizante aplicado al cultivo precedente influyó en el CAS siendo mayor esta, en la dosis 0 kg N ha⁻¹ y menor en las demás dosis de N fertilizante, sin diferencias entre ellas (Figura 29). Este mayor CAS podría estar relacionado con una menor extracción del cultivo precedente en esta dosis al obtener menor rendimiento de grano. En un estudio realizado en el mismo experimento, López-Bellido *et al.* (2007b) obtuvieron diferencias significativas en el rendimiento de grano con las diferentes dosis de N fertilizante aplicadas al trigo. Este criterio se mantuvo en los años 2002, 2004 y no en el 2001, sin que hubiera diferencias en el resto del los años en el CAS.

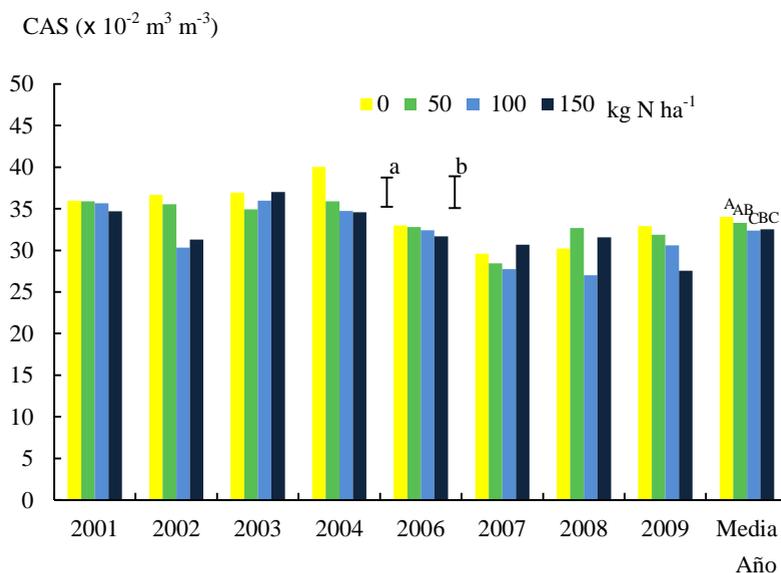


Figura 30. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el contenido de agua en el suelo (CAS) del perfil 60-90 cm de siembra en el cultivo de las habas. a y b representan niveles de significación al 95 % ($P \leq 0.05$) para la comparación de medias del mismo y de distinto año, respectivamente. Letras en mayúscula en la media representan la existencia de diferencias significativas a $P \leq 0.05$ de acuerdo con la MDS.

La dosis de N fertilizante aplicada al cultivo precedente influyó en el CAS en el horizonte 60-90 cm siendo esta mayor en la dosis 0 kg N ha⁻¹ y menor en la dosis 100 kg N ha⁻¹ (Figura 30). Esta diferenciación en cuanto a las dosis de N fertilizante sólo se mantuvo en el año 2002 mientras que en los años 2004 y 2009 las mayores diferencias se obtuvieron con la dosis 0 y 150 kg N ha⁻¹ y en el 2008 el mayor CAS se observó en la dosis 50 kg N ha⁻¹ y la de menor en la dosis 100 kg N ha⁻¹ sin que hubiera diferencias en el resto de los años.

- Cosecha

El CAS en la profundidad 0-30 cm varió entre $7 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y $40.9 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en los años 2003 y 2004, respectivamente. Las diferencias en el CAS

entre los años no estuvieron relacionadas con la lluvia anual recibida pero sí con las lluvias acontecidas en el mes de mayo, previo a la cosecha ($r=0.823$, $P \leq 0.05$). En el horizonte 30-60 cm, los datos variaron entre $20.2 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ y $41.2 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en los años 2009 y 2004, respectivamente. El CAS en el horizonte 60-90 cm varió entre $27.2 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el 2006 y $38.7 \times 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ en el 2004 coincidiendo con un año seco y lluvioso, respectivamente. En la profundidad 30-60 cm, el NL mejoró al LC en el CAS en los años 2001, 2006 y 2007 siendo estos dos últimos años secos (Figura 31). Sin embargo, en la profundidad 60-90 cm sólo mejoró el NL al LC en el 2006 sin que hubiera diferencias significativas entre los sistemas de laboreo en los demás años. En esta profundidad hay menor diferencia en el CAS entre ambos sistemas de laboreo porque el sistema radicular de las habas es más difícil que alcance esta profundidad si no se dan las condiciones necesarias de humedad, porosidad, densidad aparente y textura. Manschadi *et al.* (1998) mostraron que el 60 % de la densidad de longitud radicular se encontraba en los primeros 15 cm del suelo en floración.

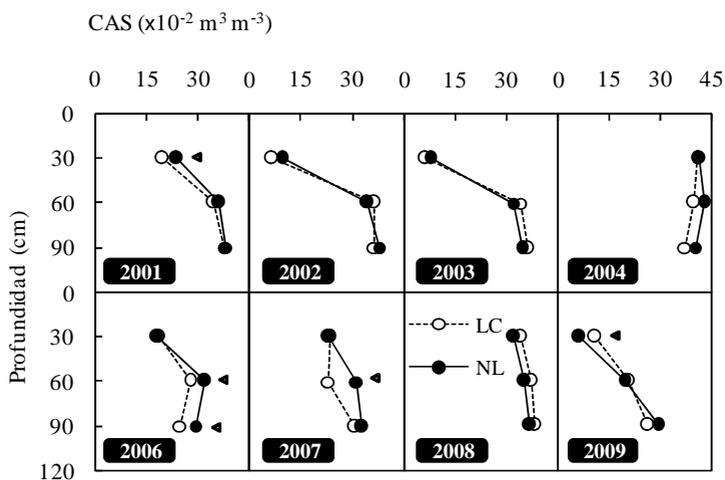


Figura 31. Contenido de agua en el suelo (CAS) en cosecha del cultivo de habas influenciado por el año y sistema de laboreo (LC: laboreo convencional; NL: no laboreo) según la profundidad de suelo. El triángulo representa (▶) diferencias significativas entre sistema de laboreo.

En la profundidad 30-60 cm, aunque la interacción año x dosis de N fertilizante aplicado al cultivo precedente fue significativa, sólo los años 2004 y 2009 mostraron diferencias entre el CAS pero fue en el año 2009, donde el CAS disminuyó a medida que aumentó la dosis de N fertilizante (Figura 32). El CAS en la interacción laboreo x dosis de N fertilizante de este mismo perfil, mostró una clara diferencia entre las dosis 0 y 50 kg N ha⁻¹ del NL con las dosis 0 y 100 kg N ha⁻¹ del LC, siendo mayor el CAS en el NL que en el LC.

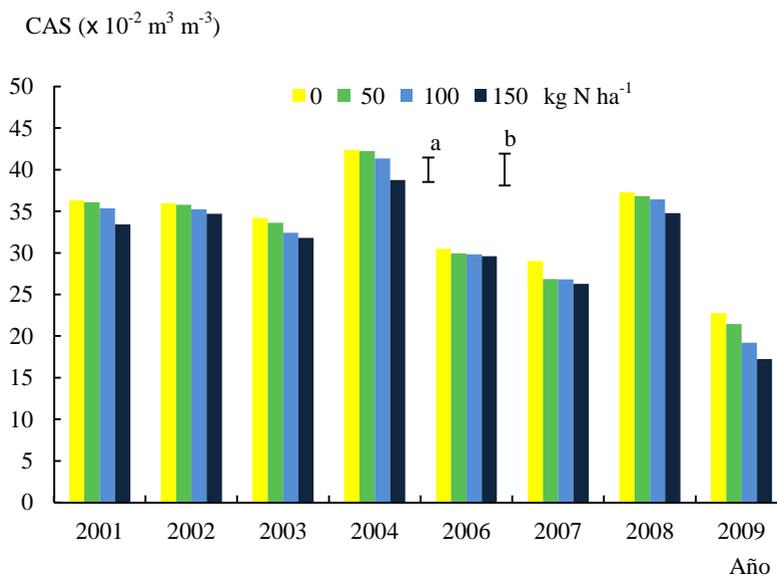


Figura 32. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el CAS del perfil 30-60 cm de cosecha en el cultivo de las habas. a y b representan niveles de significación al 95 % ($P \leq 0.05$) para la comparación de medias del mismo y de distinto año, respectivamente.

4.4.2. RENDIMIENTO DE GRANO

El rendimiento de grano mostró diferencias significativas en el año, sistema de laboreo, año x laboreo y año x dosis de N fertilizante (Tabla 13).

Tabla 13. Efecto significativo del año, sistema de laboreo y nitrógeno fertilizante en el rendimiento de grano (kg ha^{-1}), granos vaina⁻¹, vainas m^2 , peso de los 1000 granos (g) e índice de cosecha (HI) en el cultivo de habas durante 8 años.

Tratamiento	Rendimiento grano	Granos vaina ⁻¹	Vainas m^2	Peso 1000 granos	HI
Año(A)	***	***	***	***	***
S. Laboreo (L)	***	ns	***	***	***
A*L	**	*	***	**	***
Nitrógeno (N)	ns†	*	**	ns	**
A*N	***	**	**	ns	***
L*N	ns	ns	*	*	ns
A*L*N	ns	*	**	ns	***

* Significativa para 0.05 de nivel de probabilidad.

** Significativa para 0.01 de nivel de probabilidad.

*** Significativa para 0.001 de nivel de probabilidad.

†ns, no significativo.

El rendimiento de grano varió entre 591 y 2392 kg ha^{-1} en los años 2006 y 2001, respectivamente. Las diferencias de rendimiento registradas entre años también hay que atribuir las a la variación en la distribución de la lluvia en la estación de crecimiento y a la mayor intensidad de ataque de jopo (*Orobanche crenata* Forsk), el cual no pudo ser bien controlado con el tratamiento de glifosato. López-Bellido *et al.* (2003) han indicado que la alta variabilidad del rendimiento de grano está asociada con la cantidad y distribución de lluvias y con las condiciones climáticas que ocurren durante la polinización. El sistema de laboreo influyó en el rendimiento de grano mejorando el NL al LC en el conjunto de años.

Sin embargo, en la interacción año x sistema de laboreo sólo se mantuvo este criterio en los años 2002, 2004, 2006 y 2008 (Figura 33). En este sentido, se puede observar como el NL puede tener un papel más importante cuando los años son secos ya que en dos de los tres años secos, el NL mejoró al LC. El NL es un sistema que protege al suelo contra la erosión, aumenta la infiltración y reduce la

evaporación por descenso del movimiento del aire sobre el suelo, cambiando el albedo y aislando la superficie del suelo (Tanaka *et al.*, 2005).

Rendimiento de grano (kg ha⁻¹)

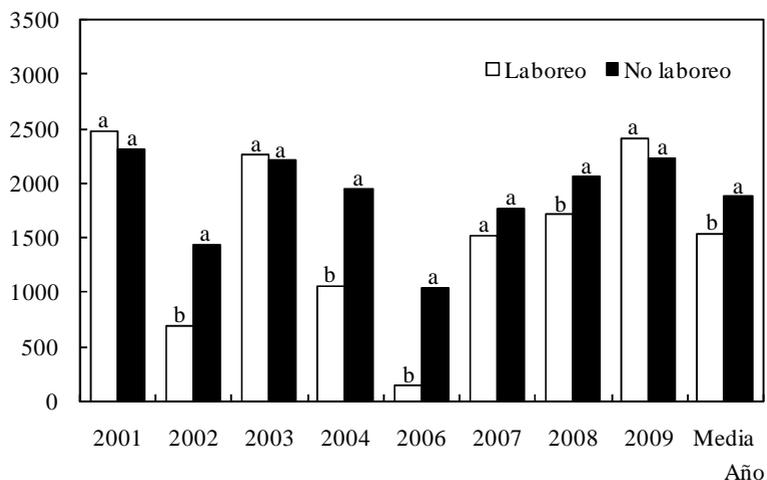


Figura 33. Efecto del año x laboreo en el rendimiento de grano del cultivo de las habas. Dentro de cada año las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

El rendimiento de grano sólo mostró diferencias entre las dosis de N fertilizante aplicado al cultivo precedente en los años 2001, 2002 y 2003. El rendimiento obtenido en la dosis 0 kg ha⁻¹ de los años 2001 y 2002 fue el más bajo respecto a las demás dosis de N fertilizante que fueron más altos (Figura 34). Estos resultados coinciden por los obtenidos por López-Bellido *et al.* (2003). Sin embargo, los rendimientos obtenidos en el año 2003 en la dosis 0 kg ha⁻¹ fueron más altos que en las demás dosis de N fertilizante. Mahler *et al.* (1988) señalaron que la incorporación de N fertilizante al suelo reduce la tasa de fijación simbiótica y ello puede repercutir en los rendimientos obtenidos.

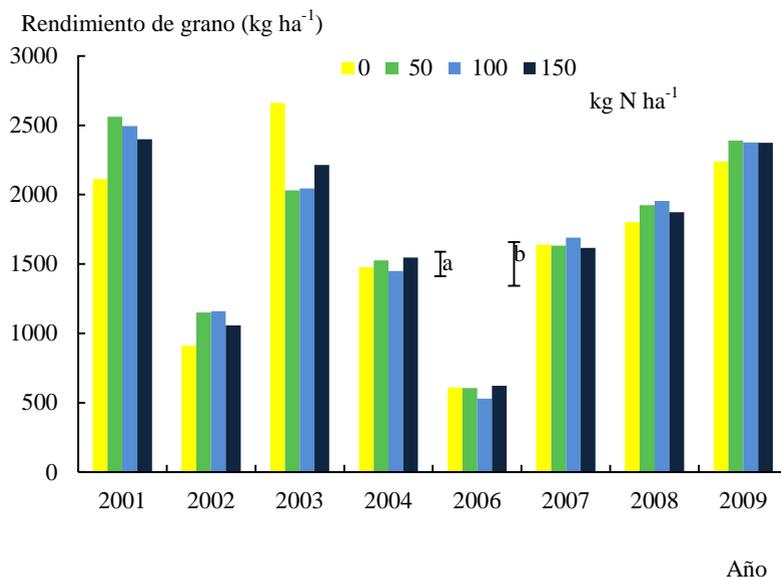


Figura 34. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el rendimiento del grano del cultivo de las habas. a y b representan niveles de significación al 95 % ($P \leq 0.05$) para la comparación de medias del mismo y de distinto año, respectivamente.

4.4.3. COMPONENTES DE RENDIMIENTO

- Granos vaina⁻¹

El número de granos vaina⁻¹ fue significativo en el año, año x laboreo, dosis de N fertilizante y en las interacciones año x dosis de N fertilizante y año x laboreo x dosis de N fertilizante (Tabla 13). El número de granos vaina⁻¹ varió entre 1.3 y 2.6 en los años 2006 y 2001, respectivamente. El número de granos vaina⁻¹ mostró relación con la precipitación total recibida ($r=0.85$, $P \leq 0.05$). El sistema de laboreo influyó en el número de granos vaina⁻¹ mejorando el NL al LC en el año 2006 y sucediendo lo contrario en el 2007 (datos no mostrados). La dosis de N fertilizante influyó en el número de granos vaina⁻¹, siendo la dosis 0 kg N ha⁻¹ la que menor número obtuvo y la que mayor la dosis 50 kg N ha⁻¹. En la interacción año x dosis de N fertilizante el número de granos vaina⁻¹ sólo mostró

diferencias significativas en los años 2001, 2006 y 2007 siendo la dosis 0 kg N ha⁻¹ la que menor número de granos vaina⁻¹ obtuvo en los años 2001 y 2006. Sin embargo, en este año 2006 no hubo diferencias entre la dosis 0 y 150 kg N ha⁻¹ al igual que en el año 2007 donde la dosis 150 kg N ha⁻¹ junto con la dosis de 100 kg N ha⁻¹ fueron las que menor número de granos vaina⁻¹ presentaron (Figura 35). En la interacción año x laboreo x dosis N fertilizante sólo hubo diferencias en los años 2001, 2002, 2006 y 2007 sin que se pudiera relacionar el efecto del sistema de laboreo y la dosis de N fertilizante.

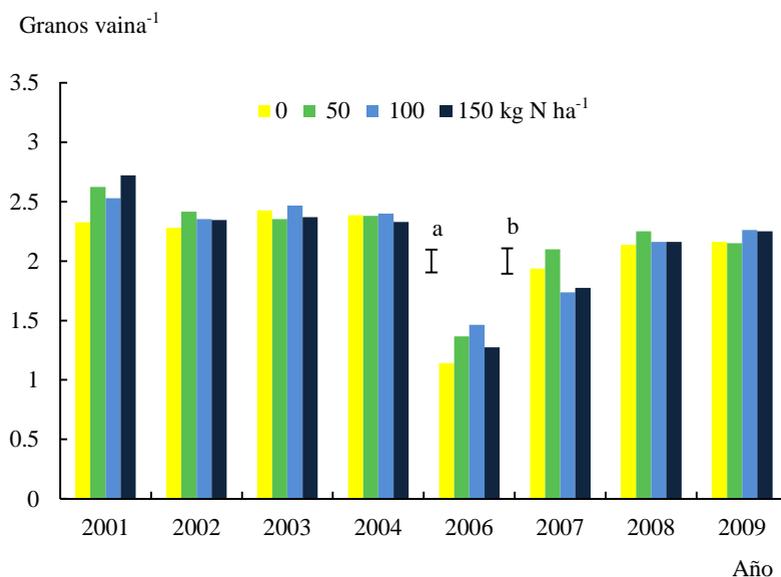


Figura 35. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el número de granos vaina⁻¹ del cultivo de las habas. a y b representan niveles de significación al 95 % (P≤0.05) para la comparación de medias del mismo y de distinto año, respectivamente.

- Vainas m⁻²

El número de vainas m^{-2} mostró diferencias significativas en todas las fuentes de variación estudiadas (Tabla 13). Las vainas m^{-2} variaron entre 89 y 291 en los años 2002 y 2009, respectivamente. El sistema de laboreo influyó en el número de vainas m^{-2} mejorando el NL al LC, mientras que en la interacción año x laboreo el NL mejoró al LC en 5 de los 8 años sin que hubiera diferencias significativas para el resto de los años (Figura 36). La dosis de N fertilizante influyó en las vainas m^{-2} , siendo la dosis 100 $kg N ha^{-1}$ la que mayor número de vainas m^{-2} obtuvo sin diferencias con las dosis 0 y 150 $kg N ha^{-1}$ y la que menor fue la dosis 50 $kg N ha^{-1}$. En la interacción año x dosis de N fertilizante, las vainas m^{-2} en los años 2002, 2003 y 2009 mostraron diferencias significativas entre las dosis de N fertilizante.

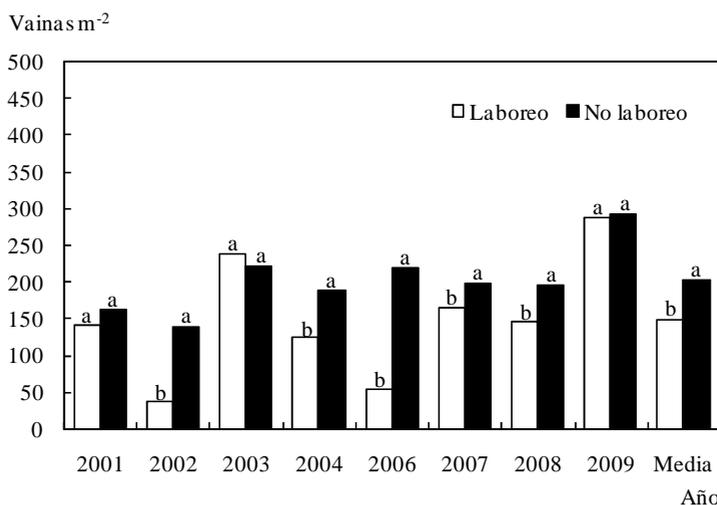


Figura 36. Efecto del año x laboreo en el número de vainas m^{-2} del cultivo de las habas. Dentro de cada año las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

Sólo en el 2009 la dosis más alta de N fertilizante aplicado al cultivo precedente fue la que mayor número de vaina m^{-2} obtuvo y la que menor la dosis

50 kg N ha⁻¹ pero sin diferencias significativas con las demás dosis de N fertilizante. En cuanto a la interacción laboreo x dosis de N fertilizante, el NL obtuvo mayor número de vainas m⁻² en las dosis mayores de N fertilizante y disminuyó en las dosis más bajas de N fertilizante, sin embargo, en el LC la que mayor número de vainas m⁻² fue la dosis 0 kg N ha⁻¹ y la que menor fue la dosis 150 kg N ha⁻¹. El número de vainas m⁻² fue, dentro de los componentes de rendimiento, el que mayor relación tuvo con el rendimiento de grano ($r= 0.70$, $P\leq 0.05$). Estos resultados coinciden por los aportados por De Costa *et al.* (1997) y difieren de los obtenidos por López-Bellido *et al.* (2003).

- Peso de los 1000 granos

El peso de los 1000 granos mostró diferencias significativas en el año, en el sistema de laboreo, año x laboreo y laboreo x dosis de N fertilizante (Tabla 13). El peso de los 1000 granos varió entre 918 y 401 g en los años 2001 y 2006, respectivamente. En el conjunto de los años, el NL mejoró el peso de los 1000 granos respecto al LC (Figura 37). Los mismos resultados fueron obtenidos por López-Bellido *et al.* (2003). Estos resultados podrían estar relacionados con el mayor CAS en siembra en el NL, que permitiría al sistema radicular profundizar mucho más que con el LC y extraer el agua cuando esta es más escasa en niveles superiores y necesaria en el llenado del grano. Muñoz-Romero *et al.* (2011) indicaron que el sistema radicular de las habas está más concentrado en los años que son más secos. En la interacción año x laboreo sólo los años 2001, 2004 y 2006 el NL mejoró al LC sin que hubiera diferencias significativas en el resto de los años (Figura 37).

Peso de los 1000 granos (g)

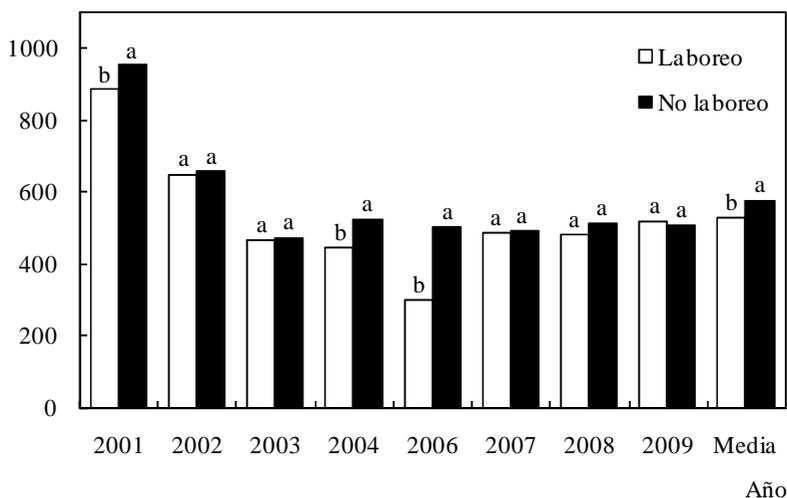


Figura 37. Efecto del año x laboreo en el peso de los 1000 granos (g) del cultivo de las habas. Dentro de cada año las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

Aunque la interacción laboreo x dosis de N fertilizante mostró diferencias significativas entre ellas, estas estuvieron reflejadas principalmente entre los dos sistemas de laboreo y no así entre las dosis de N fertilizante aplicadas a excepción de la dosis 50 kg N ha^{-1} que no tuvo diferencias entre los dos sistemas de laboreo.

4.4.4. ÍNDICE DE COSECHA (HI)

El HI mostró diferencias significativas en todas las fuentes de variación estudiadas a excepción de la interacción laboreo x dosis de N fertilizante (Tabla 13). El HI varió entre 29 y 58 % en los años 2006 y 2001, respectivamente. A pesar de coincidir con un año seco y el otro con un año lluvioso no hubo relación con la lluvia anual. Estos resultados difieren de los obtenidos por López-Bellido *et al.* (2003), debido posiblemente a una menor diferencia de precipitación entre los años de estudio. En el conjunto de años, el sistema de laboreo influyó en el HI

mejorando el NL al LC mientras que en la interacción año x laboreo, el NL mejoró al LC en 5 de los 8 años de estudio y el LC mejoró al NL en un año (Figura 38).

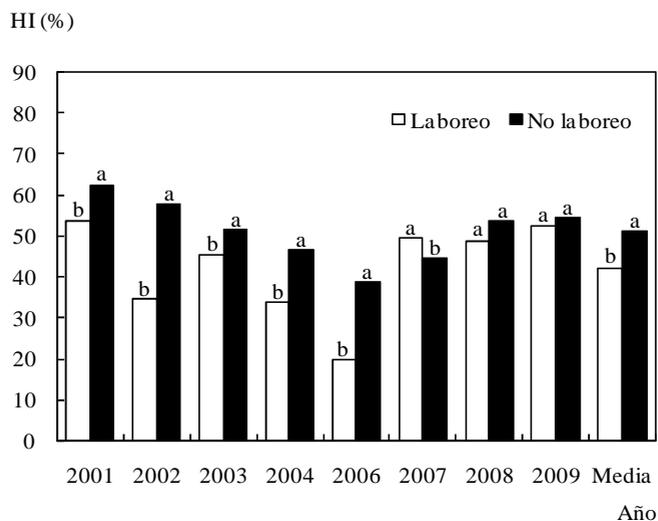


Figura 38. Efecto del año x laboreo en el índice de cosecha (HI) del cultivo de las habas. Dentro de cada año las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

La dosis de N fertilizante aplicado al cultivo precedente tuvo efecto negativo sobre el HI, así a mayor dosis de nitrógeno menor HI respectivamente aunque la que mayor HI obtuvo fue la dosis 50 kg N ha^{-1} sin diferencias con las dosis 0 y 100 kg N ha^{-1} (datos no mostrados). En la interacción año x dosis de N fertilizante, sólo hubo diferencias en los años 2002, 2004 y 2006 obteniéndose en dos de estos años menor HI con la dosis 150 kg N ha^{-1} fertilizante (Figura 39).

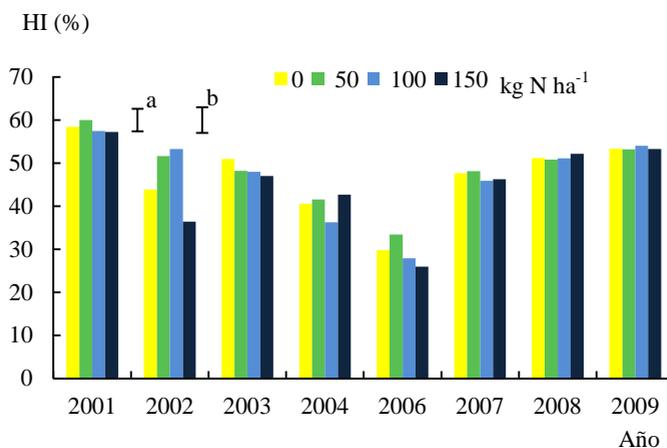


Figura 39. Efecto del año x dosis de N fertilizante en el índice de cosecha (HI) del cultivo de las habas. a y b representan niveles de significación al 95 % ($P \leq 0.05$) para la comparación de medias del mismo y de distinto año, respectivamente.

4.4.5. EFICIENCIA EN EL USO DE LA PRECIPITACIÓN (PUE)

La eficiencia en el uso de la precipitación (PUE) fue altamente significativa en el año, sistema de laboreo, año x laboreo y año x dosis de N fertilizante (Tabla 14).

Tabla 14. Efecto del año, sistema de laboreo y N fertilizante residual en la eficiencia en el uso de la precipitación (PUE), en el uso del agua (WU) y en la eficiencia en el uso del agua (WUE) del cultivo de habas durante 8 años.

Tratamiento	PUE (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)	WU (mm)	WUE (kg ha ⁻¹ mm ⁻¹)
Año(A)	***	***	***
S. laboreo (L)	***	*	***
A*L	***	***	***
Nitrógeno (N)	ns	**	ns
A*N	***	ns	***
L*N	ns	ns	ns
A*L*N	ns	ns	ns

* Significativa para 0.05 de nivel de probabilidad.

** Significativa para 0.01 de nivel de probabilidad.

*** Significativa para 0.001 de nivel de probabilidad.

†ns, no significativo.

Los datos variaron entre 2.2 kg ha⁻¹ mm⁻¹ y 7.7 kg ha⁻¹ mm⁻¹, respectivamente. El sistema de laboreo influyó en la PUE siendo el NL más eficiente que el LC. Sin embargo, en la interacción año x laboreo esta eficiencia se mantuvo sólo en los años 2002, 2004, 2006, 2007 y 2008 siendo los tres últimos años secos y sin diferencias entre los dos sistemas de laboreo en el resto de años (Figura 40). Según Corbeels *et al.* (1998), disminuyendo el laboreo y manteniendo los residuos en la superficie se reduce la escorrentía y aumenta la infiltración. Peterson *et al.* (1996) mostraron que el NL aumentaba el almacenamiento de la precipitación en el perfil del suelo comparado con el LC.

La PUE en la interacción año x dosis de N fertilizante sólo mostró diferencias significativas en los años 2001 y 2003 observándose en estos años la falta de diferencias entre la dosis 100 y 150 kg ha⁻¹ y no aclarando cuál de las dos dosis (0 y 50 kg N ha⁻¹) puede ser la más eficiente (Figura 41).

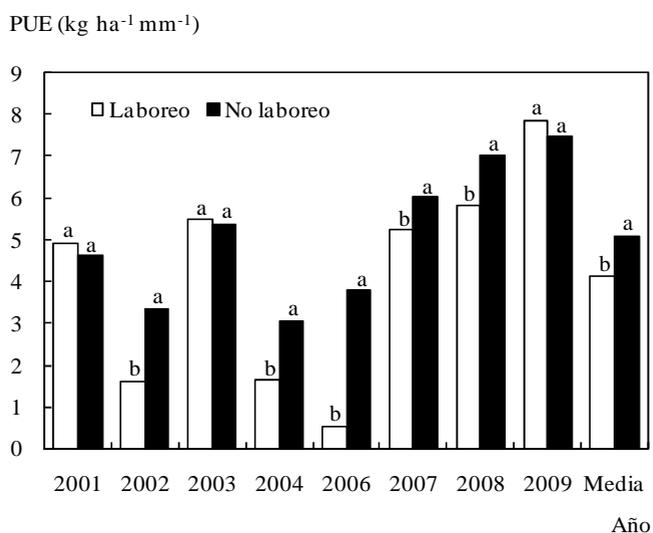


Figura 40. Efecto del año x laboreo en la eficiencia en el uso de la precipitación (PUE) del cultivo de las habas. Dentro de cada año las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

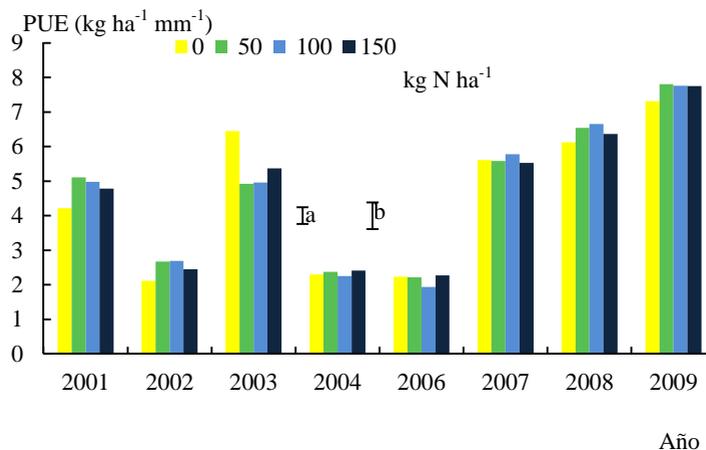


Figura 41. Efecto del año x dosis de N fertilizante en la eficiencia en el uso de la precipitación (PUE) del cultivo de las habas. a y b representan niveles de significación al 95 % ($P \leq 0.05$) para la comparación de medias del mismo y de distinto año, respectivamente.

4.4.6. USO DEL AGUA (WU)

El uso de agua (WU) mostró diferencias significativas en el año, sistema de laboreo, año x laboreo y dosis de N fertilizante (Tabla 14). El WU varió entre 269 y 616 mm en los años 2006 y 2004, respectivamente. El WU no está relacionado con los rendimientos del cultivo. López-Bellido *et al.* (2007b) en un estudio realizado sobre el trigo obtuvo los mismos resultados relacionándolo con la distribución de la lluvia y con el almacenamiento del agua en el suelo. En el conjunto de los años, el NL mejoró al LC y en la interacción año x sistema de laboreo el NL mejoró al LC sólo en los años 2006, 2008 y 2009 siendo dos de ellos años secos y el LC mejoró al NL en los años 2002 y 2007 siendo uno lluvioso y otro seco, respectivamente (Figura 42). La dosis de N fertilizante aplicada al cultivo precedente influyó en el WU siendo mayor en la dosis 0 kg N ha⁻¹ y más bajo en la dosis 150 kg N ha⁻¹.

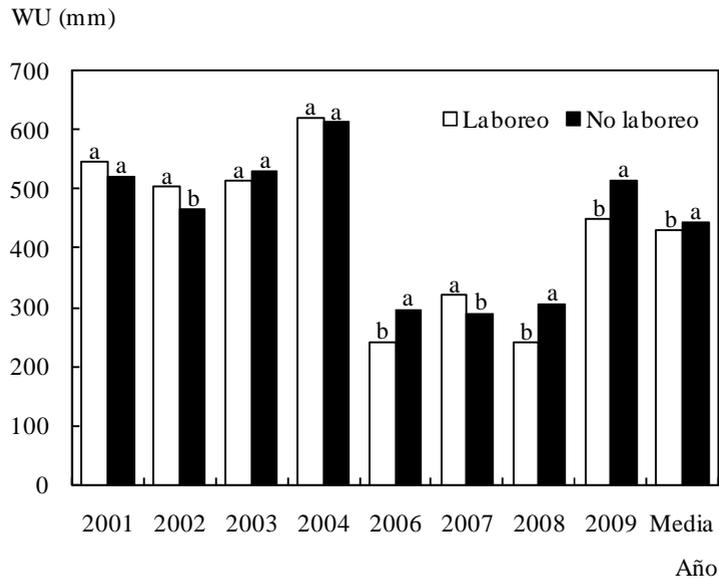


Figura 42. Efecto del año x laboreo en el uso del agua (WU) del cultivo de las habas. Dentro de cada año las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

4.4.7. EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA (WUE)

La eficiencia en el uso del agua fue significativa en el año, sistema de laboreo, año x laboreo y año x dosis de N fertilizante (Tabla 14). Los datos variaron entre $2.1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ y $7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ en los años 2006 y 2008, siendo ambos años secos. El sistema de laboreo influyó en la WUE siendo el NL más eficiente que el LC. Sin embargo, en la interacción año x sistema de laboreo, el NL mejoró en 4 de los 8 años al LC y el LC mejoró al NL en un año (Figura 43).

WUE ($\text{kg ha}^{-1} \text{mm}^{-1}$)

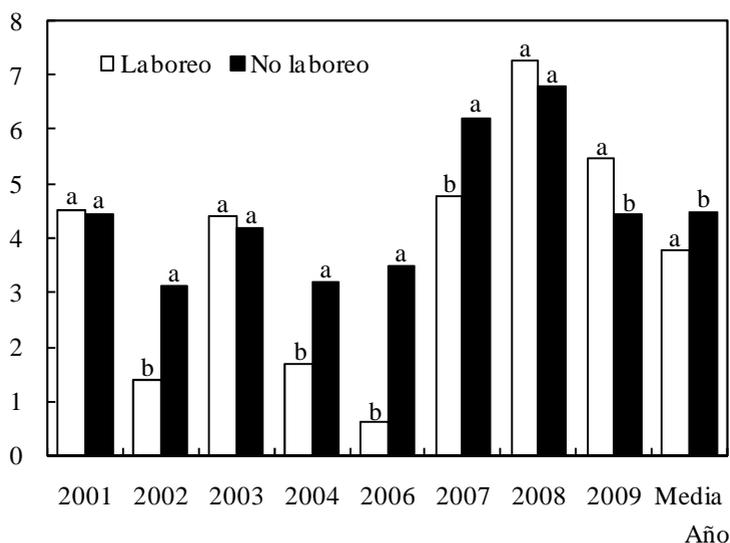


Figura 43. Efecto del año x laboreo en la eficiencia en el uso del agua (WUE) del cultivo de las habas. Dentro de cada año las medias seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes según la MDS ($P \leq 0.05$).

El manejo de los residuos es muy importante para aumentar los beneficios del no laboreo en la acumulación del agua en el suelo (Fisher, 1987; Lal, 1989). Estos resultados difieren de los obtenidos por López y Arrúe (1997) cuyos valores del WUE fueron más bajos en el NL que en el LC. Estos resultados pudieron atribuirse a que hubo poca cantidad de restos vegetales sobre el suelo en el NL. A este respecto, Cantero-Martínez *et al.* (2007) indicaron que las precipitaciones recibidas durante el llenado de grano, pueden dar lugar a una infiltración más rápida en el suelo por el LC debido a que en el NL existe una mayor interceptación de la lluvia por la biomasa y los residuos, pudiendo intervenir en los resultados de los rendimientos, a favor del laboreo convencional.

La WUE en la interacción año x dosis de N fertilizante sólo fue significativa en los años 2003 y 2008, siendo la dosis 0 kg N ha⁻¹ más eficiente que las dosis 50 y 150 kg N ha⁻¹ en el año lluvioso. En el año seco, la dosis más eficiente fue la de 100 kg N ha⁻¹ sin diferencias con las dosis de 50 y 150 kg N ha⁻¹ pero sí con la dosis 0 kg N ha⁻¹ (Figura 44).

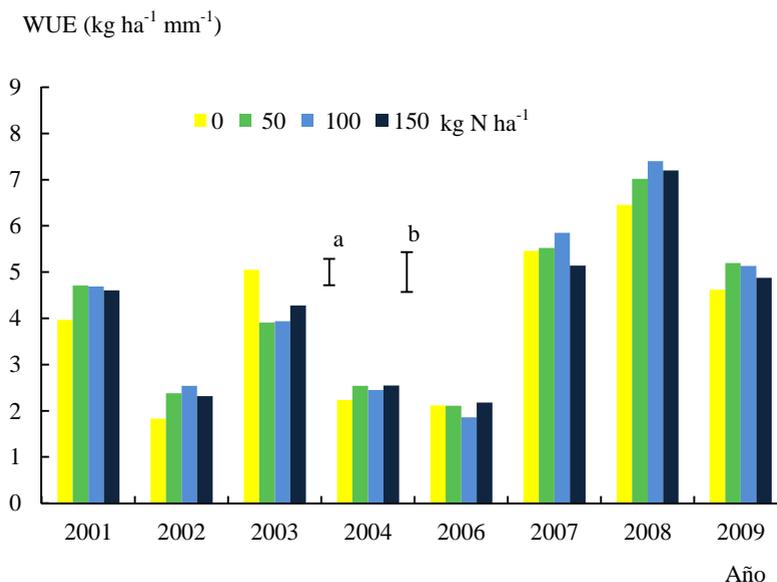


Figura 44. Efecto del año x dosis de N fertilizante en la eficiencia en el uso del agua (WUE) del cultivo de las habas. a y b representan niveles de significación al 95 % ($P \leq 0.05$) para la comparación de medias del mismo y de distinto año, respectivamente.

5. CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

La variabilidad estacional y anual de la precipitación recibida a lo largo de los 9 años de estudio tuvo gran influencia en el contenido de agua en el suelo en siembra y cosecha, en el rendimiento de grano y sus componentes, así como en los índices de eficiencia en el uso de la precipitación, uso del agua y eficiencia en el uso del agua en los cultivos de garbanzo, habas y girasol.

El no laboreo registró mayor contenido de agua en siembra en el perfil completo del suelo en el cultivo del garbanzo, de habas y en el horizonte 0-30 cm en el cultivo de girasol. También el no laboreo mejoró las condiciones del lecho de siembra y el establecimiento de los cultivos.

El sistema de no laboreo aumentó el rendimiento de grano de los cultivos de garbanzo y habas respecto al laboreo convencional. Así mismo dicho sistema de laboreo mejoró el uso del agua en ambos cultivos y la eficiencia en el uso de la precipitación y la eficiencia en el uso del agua de las habas. Estas diferencias entre ambos sistemas de laboreo estudiados fueron más acusadas en los años secos.

El N fertilizante aplicado al cultivo de trigo precedente a los cultivos de garbanzo, habas y girasol no influyó en los índices hídricos estudiados, en el rendimiento y componentes de rendimiento de los cultivos. La fijación simbiótica de N por las leguminosas y las escasas e irregulares precipitaciones durante el ciclo del cultivo en el periodo analizado pueden justificar dicha falta de respuesta.

6. REFERENCIAS

6. REFERENCIAS

Abdel-Daiem, M., Hassan, M.F., Hamdi, Y.A., 1988. Nitrogen fixation and yield of faba bean, lentil and chickpea in response to selected agricultural practices in Egipt, in: R.J. Dummerfield (Ed.). *World crops: Cool season food legumes*. Kluwer Academic Publ., Dordrecht, the Netherlands, pp. 189–204.

Aboudrare, A., Debaeke, P., Bouaziz, A., Chekli, H., 2006. Effects of soil tillage and fallow management on soil water storage and sunflower production in a semi-arid Mediterranean climate. *Agric. Water Manage.* 83, 183–196.

Adams, J.E., Hanks, R.J., 1964. Evaporation from soil shrinkage cracks. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38, 281–284.

Ahmad, N., Mermut, A., 1997. *Vertisols and technologies for their management*. Developments in Soil Sciences. Elsevier, Amsterdam.

Alvarez, R., Steinbach, H.S., 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil Tillage Res.* 103, 65–72.

Amir, J., Krikun, J., Orion, D., Putter, J., Klitman, S., 1991. Wheat production in an arid environment: I. Water-use efficiency, as affected by management practices. *Field Crop. Res.* 27, 351–364.

Anderson, R.L., 2005. Are some crops synergistic to following crops?. *Agron. J.* 97, 7–10.

Anderson, R.L., Bowman, R.A., Nielsen, D.C., Vigil, M.F., Aiken, R.M., Benjamin, J.G., 1999. Alternative crop rotation for the central Great Plains. *J. Prod. Agric.* 12, 95–99.

Angus, J.F., Van Herwaarden, A.F., 2001. Increasing water use and water use efficiency in dryland wheat. *Agron. J.* 93, 290–298.

Asseng, S., Turner, N.C., Keating, B.A., 2001. Analysis of water and nitrogen-use efficiency in dryland wheat in a Mediterranean climate. *Plant Soil* 233, 127–143.

Bandyopadhyay, K.K., Mohanty, M.K., Painuli, D.K., Misra, A.K., Hati, K.M., Mandal, K.G., Ghosh, P.K., Chaudhary, R.S., Acharya, C.L., 2003. Influence of tillage practices and nutrient management on crack parameters in a Vertisol of central India. *Soil Tillage Res.* 71, 133–142.

Ben Romdhane, S., Trabelsi, M., Aouani, M.E., de Lajudie, P., Mhamdi, R., 2009. The diversity of rhizobia nodulating chickpea (*Cicer arietinum*) under water deficiency as a source of more efficient inoculants. *Soil Biol. Biochem.* 41, 2568–2572.

Blevins, R.L., 1986. Idoneidad del suelo para el laboreo nulo. En: *Agricultura sin laboreo. Principios y aplicaciones.* R.E. Phillips y S.H. Phillips (Eds.). Ediciones Bellaterra. Barcelona. pp. 44–68.

Blevins, R.L., Frye, W.W., 1993. Conservation tillage: an ecological approach to soil management. *Adv. Agron.* 51, 33–78.

Bond, D.A., Lawes, D.A., Hawtin, G.C., Saxena, M.C., J.H. Stephens., 1985. Faba bean (*Vicia faba* L.), in: R.J. Summerfield and E.H. Roberts (Eds.). *Grain legume crops.* Collins, London. pp. 199–265.

Bouma, J., 1984. Using soil morphology to develop measurement methods and simulation techniques for water movement in heavy clay soils, in: Bouma, J., P.A.C. Raats, (Eds.). *Proceedings of the ISSS Symposium on Water and Solute Movement in Heavy Clay Soils, August 27-31, 1984.* ILRI, Wageningen, The Neterlands, pp. 298–310.

Buddenhagen, I.W., 1990. Legumes in farming systems in Mediterranean climates, in: Osman, A.E., Ibrahim, M.H., Jones, M.A. (Eds.). *The Role of Legumes in the Farming Systems of the Mediterranean Areas*. Kluwer Academic. The Netherlands, pp. 3–29.

Cantero-Martínez, C., Angás, P., Lampurlanés, J., 2007. Long-term yield and water use efficiency under various tillage systems in Mediterranean rainfed conditions. *Ann. Appl. Biol.* 150, 293–305.

Conway, K.E., 1996. An overview of the influence of sustainable agricultural systems on plant diseases. *Crop Protection* 15, 223–228.

Corbeels, M., Hofman, G., Van Cleemput, O., 1998. Analysis of water use by wheat grown on a cracking clay soil in a semi-arid Mediterranean environment: Weather and nitrogen effects. *Agric. Water Manage.* 38, 147–167.

Coulombe, C.E., Wilding, L.P., Dixon, J.B., 1996. Overview of Vertisols: characteristics and impacts on society. *Adv. Agron.* 57, 289–375.

Dalal, R.C., Strong, W.M., Doughton, J.A., Weston, E.J., McNamara, G.T., Cooper, J.E., 1997. Sustaining Productivity of a Vertosol at Warra, Queensland, with fertiliser, no-tillage or legumes. 4. Nitrogen fixation, water use and yield of chickpea. *Australian J. Experimental Agriculture*, 37, 667–676.

De Costa, W.A.J.M., Dennet, M.D., Ratnaweera, U., Nyalemegbe, K., 1997. Effects of different water regimes on field-grown determinate and indeterminate faba bean (*Vicia faba* L.): II. Yield, yield components and harvest index. *Field Crop. Res.* 52, 169–178.

Elliot, L.F., Stott, D.E., 1997. Influence of no till cropping systems on microbial relationships. *Adv. Agron.* 60, 121–147.

Fisher, R.A., 1987. Responses of soil and crop water relations to tillage, in: Tillage, P.S. Cornish and J.E. Pratley. (Eds.). Melbourne, Australia: Inkata Press, pp. 194–221.

Gan, Y.T., Warkentin, T.D., Bing, D.J., Stevenson, F.C., McDonald, C.L., 2010. Chickpea water use efficiency in relation to cropping system, cultivar, soil nitrogen and Rhizobial inoculation in semiarid environments. *Agric. Water Manage.* 97, 1375–1381.

Gan, Y.T., McDonald, C.L., Warkentin, T.D., Zentner, R.P., Vandenberg, A., 2009. Seed yield and yield stability of chickpea in response to cropping systems and soil fertility in northern latitudes. *Agron. J.* 101, 1113–1122.

Germon, J.C., Taureau, J.C., 1991. Simplification du travail du sol et transformations de l'azote; conséquences sur le lessivage des nitrates. *Perspectives Agricoles* 162, 40–51.

Giráldez, J.V., González, P., Federes, E., 1986. Aprovechamiento del agua del suelo en distintos sistemas de laboreo: cinco años de experiencia en el Valle del Guadalquivir. I Simposium sobre Mínimo Laboreo en Cultivos Herbáceos. E.T.S.I.A. Univ. Politécnica. Madrid, 1-2 octubre 1986. pp. 9–32.

Göksoy, A.T., Demir, A.O., Turana, Z.M., Dagüstü, N., 2004. Responses of sunflower (*Helianthus annuus* L.) to full and limited irrigation at different growth stages. *Field Crop. Res.* 87,167–178.

Gómez, K.A., Gómez, A.A., 1984. Statistical procedures for agricultural research. John Wiley & Sons, New York.

Grashoff, C., 1990b. Effect of pattern of water supply on *Vicia faba* L. II. Pod retention and filling, dry matter partitioning, production and water use. *J. Agric. Sci.* 38,131–143.

Grashoff, C., 1990a. Effect of pattern of water supply on *Vicia faba* L. I. Dry matter partitioning and yield variability. *J. Agric. Sci.* 38, 21–44.

Halvorson, A.D., Reule, C.A., 1994. Nitrogen fertilizer requirements in an annual dryland cropping system. *Agron. J.* 86, 315–318.

Hatfield, J.L., Sauer, T.J., Prueger, J.H., 2001. Managing soils to achieve greater water use efficiency: A review. *Agron. J.* 93, 271–280.

Heichel, G.H., 1987. Legume nitrogen: Symbiotic fixation and recovery by subsequent crops, in: Z.R. Helsen (Ed.). *Energy in plant nutrition and pest control*. Elsevier Scientific Publishers, Amsterdam, pp. 63–80.

Hesterman, O.B., Ruselle, M.P., Shaeffer, C.C., Heichel, G.H., 1987. Nitrogen utilization from fertilizer and legumes residues in legume-corn rotations. *Agron. J.* 78, 19–23.

Herridge, D.F., 1982. Relative Abundance of Ureides and Nitrate in Plant Tissues of Soybean as a Quantitative Assay of Nitrogen Fixation. *Plant Physiol.* 70, 1–6.

Hill, R.L., 1990. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 161–166.

Hosseini, N.M., Palta, J.A., Berger, J.D., Siddique, K.H.M., 2009. Sowing soil water content effects on chickpea (*Cicer arietinum* L.): Seedling emergence and early growth interaction with genotype and seed size. *Agric. Water Manage.* 96, 1732–1736.

Huwe, B., 2003. The Role of Soil Tillage for Soil Structure, in: *Soil Tillage in Agroecosystems*. A. El Titi (Eds.). CRC Press, Boca Raton, FL. pp. 27–49.

Izaurrealde, R.C., Choudhary, M., Juma, N.G., McGill, W.B., Haderlein, L., 1995. Crop and nitrogen yield in legume-based rotations practiced with zero tillage and low-input methods. *Agron. J.* 87, 958–964.

Izaurrealde, R.C., Juma, N.G., McGill, W.B., Chanasyk, D.S., Pawluk, S., Dudas, M.J., 1993. Performance of conventional and alternative cropping systems in cryoboreal subhumid central Alberta. *J. Agric. Sci.* 120, 33–41.

Izumi, Y., Uchida, K., Iijima, M., 2004. Crop production in successive wheat-soybean rotation with no-tillage practice in relation to the root system development. *Plant Prod. Sci.* 7, 329–336.

Jensen, E.S., Hauggaard-Nielsen, H., 2003. How can increased use of biological N₂ fixation in agriculture benefit the environment?. *Plant Soil* 252, 177–186.

Karlen, D.L., Varvel, G.E., Bullock, D.G., Cruse, R.M., 1994. Crop rotations for the 21st century. *Adv. Agron.* 53, 2–45.

Lal, R., Stewart, B.A., 1995. Managing soils for enhancing and sustaining agricultural Production, in: R. Lal, and B.A. Stewart (Eds.). *Soil Management-Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.

Lal, R., 1989. Conservation tillage for sustainable agriculture: tropics versus temperate environments. *Adv. Agron.* 42, 85–197.

Lithourgidis, A.S., Damalas, C.A., Gagianas, A.A., 2006. Long-term yield patterns for continuous winter wheat cropping in northern Greece. *Europ. J. Agron.* 35, 208–214.

Loomis, R.S., Connor, D.J., 1992. *Crop Ecology*. Cambridge University Press. New York.

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 Tillage Res.* 44, 35–54.

López-Bellido, L., Muñoz-Romero, V., López-Bellido, R.J., 2013. Nitrate accumulation in the soil profile: Long-term effects of tillage, rotation and N rate in a Mediterranean Vertisol. *Soil & Tillage Res.* 130, 18–23.

López-Bellido, R.J., López-Bellido, L., Benítez-Vega, J., Muñoz-Romero, V., López-Bellido, F.J., Redondo, R., 2011. Chickpea and faba bean nitrogen fixation in Mediterranean rainfed Vertisol: Effect of the tillage system. *Eur. J. Agron.* 34, 222–230.

López-Bellido, R.J., Fontán, J.M., López-Bellido, F.J., López-Bellido, L., 2010. Carbon sequestration by tillage, rotation, and nitrogen fertilization in a Mediterranean Vertisol. *Agron. J.* 102, 310–318.

López-Bellido, F.J., López-Bellido, R.J., Khalil, S.K., López-Bellido, L., 2008. Effect of planting date on winter kabuli chickpea growth and yield under rainfed mediterranean conditions. *Agron. J.* 100, 957–964.

López-Bellido, R.J., López-Bellido, L., Benítez-Vega, J., López-Bellido, F.J., 2007b. Tillage system, preceding crop, and nitrogen fertilizer in wheat crop: I. Water utilization. *Agron. J.* 99, 66–72.

López-Bellido, R.J., López-Bellido, L., Benítez-Vega, J., López-Bellido, F.J., 2007a. Tillage system, preceding crop, and nitrogen fertilizer in wheat crop: I. Soil water content. *Agron. J.* 99, 59–65.

López-Bellido, L., López-Bellido, R.J., Castillo, J.E., López-Bellido, F.J., 2004. Chickpea response to tillage and soil residual nitrogen in a continuous rotation with wheat I. Biomass and seed yield. *Field Crop. Res.* 88, 191–200.

López-Bellido, R.J., López-Bellido, L., López-Bellido, F.J., Castillo, J.E., 2003. Faba bean (*Vicia faba* L.) response to tillage and soil residual nitrogen in a continuous rotation with wheat (*Triticum aestivum* L.) under rainfed Mediterranean conditions. *Agron. J.* 95, 1253–1261.

López-Bellido, R.J., López-Bellido, L., Castillo, J.E., López-Bellido, F.J., 2002. Sunflower response to tillage and soil residual nitrogen in a wheat-sunflower rotation under rainfed Mediterranean conditions. *Aus. J. Agric. Res.* 53, 1027–1033.

López Bellido, L., Fuentes, M., Castillo, J.E., López Garrido, F.J., Fernández, E.J., 1996. Long term tillage, crop rotation and nitrogen fertilizers effects an wheat yield under rainfed Mediterranean conditions. *Agron. J.* 88, 783–791.

López Bellido, L., López-Bellido, R.J., 2000. Efectos ambientales de la rotación trigo-girasol. *Vida Rural.* 104, 24–31.

Loss, S.P., Siddique, K.H.M., 1997. Adaption of faba bean (*Vicia faba* L.) to dryland Mediterranean-tipe environments: I. Seed yield and yield components. *Field Crop. Res.* 52, 17–28.

Mackay, A.D., Klavdivko, E.J., 1985. Earthworms and rate of breakdown of soybean and maize residues in soil. *Soil Biol. Biochem.* 17, 851–857.

Mahler, R.L., Saxena, M.C., Aeschlimann, J., 1988. Soil fertility requirements of pea, lentil, chickpea and faba bean, in: R.J Dummerfield (Eds.). *World crops: Cool season legumes.* Kluwer Academic Publ., Dordrcht. The Netherlands, pp. 279–289.

Maiorana, M., Convertini, G., Di Bari, V., Rizzo, V., 1992. Yield and quality of durum wheat (*Triticum durum* Desf.) under continuous cropping after nine years of Straw incorporation. *Eur. J. Agron.* 1, 11–19.

Manschadi, A.M., Sauerborn, J., Stutzel, H., Gobel, W., Saxena, M.C., 1998. Simulation of faba bean (*Vicia faba* L.) root system development under Mediterranean conditions. *Eur. J. Agron.* 9, 259–272.

McConkey, B.G., Curtin, D., Campbell, C.A., Brandt, S.A., Selles, F., 2002. Crop and soil nitrogen status of tilled and no-tillage systems in semiarid regions of Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* 82, 489–498.

McGee, E.A., Peterson, G.A., Westfall, D.G., 1997. Water storage efficiency in no-till dryland cropping systems. *J. Soil Water Conserv.* 52, 131–136.

McIntosh, M.S., 1983. Analysis of combined experiments. *Agron. J.* 75, 153–155.

Melero, S., López-Bellido, R.J., López-Bellido, L., Muñoz-Romero, V., Moreno, F., Murillo, J.M., 2011. Long-term effect of tillage, rotation and nitrogen fertiliser on soil quality in a Mediterranean Vertisol. *Soil Till. Res.* 114, 97–107.

Melero, S., López-Garrido, R., Madejón, E., Murillo, J.M., Vanderlinden, K., Ordóñez, R., Moreno, F., 2009. Long-term effects of conservation tillage on organic fractions in two soils in southwest of Spain. *Agric. Ecosyst. Environ.* 133, 68–74.

Mitchell, A.R., Van Genuchten, M.T., 1992. Shrinkage of bare and cultivated soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56, 1036–1042.

Mohale, K.C., Belane, A.K., Dakora, F.D., 2014. Symbiotic N nutrition, C assimilation, and plant water use efficiency in Bambara groundnut (*Vigna subterranea* L. Verdc) grown in farmers' fields in South Africa, measured using ¹⁵N and ¹³C natural abundance. *Biol Fertil Soil*. 50, 307–319.

Montemurro, F., 2009. Different Nitrogen Fertilization Sources, Soil Tillage, and Crop Rotations in Winter Wheat: Effect on Yield, Quality, and Nitrogen Utilization. *J. Plant Nutr.* 32, 1–18.

Moroke, T.S., Schwartz, R.C., Brown, K.W., Juo, A.S.R., 2011. Water use efficiency of dryland cowpea, sorghum and sunflower under reduced tillage. *Soil Till. Res.* 112, 76–84.

Moroke, T.S., Schwartz, R.C., Brown, K.W., Juo, A., 2002. Soil water use and grain yield of three dryland crops under differing tillage systems. *Agron. Abstracts*.

Muñoz-Romero, V., López-Bellido, L., López-Bellido, R.J., 2012. The effects of the tillage system on chickpea root growth. *Field Crop. Res.* 128, 76–81.

Muñoz-Romero, V., López-Bellido, L., López-Bellido, R.J., 2011. Faba bean root growth in a Vertisol: Tillage effects. *Field Crop. Res.* 120, 338–344.

Nielsen, D.C., Unger, P.W., Millar, P.R., 2005. Efficient water use in dryland cropping systems in the Great Plains. *Agron. J.* 97, 364–372.

Nielsen, D.C., Vigil, M.F., Anderson, R.L., Bowman, R.A., Benjamin, J. G., Halvorson, A.D., 2002. Cropping system influence on planting water content and yield of winter wheat. *Agron. J.* 94, 962–967.

Papastylianou, I., 1993. Productivity and nitrogen fertilizer requirements of barley in rotation systems in rainfed Mediterranean conditions. *Eur. J. Agron.* 2, 119–129.

Papendick, R.I., Chowdhury, S.L., Johansen, C., 1988. Managing systems for increasing productivity of pulses in dryland agriculture, in: R.J. Dummerfield (ed.). *World crops: Cool season food legumes*. Klumwer Academic Publ., Dordrecht, the Netherland. pp. 237–255.

Paustian, K., Collins, H.P., Paul, E.A., 1997. Management controls in soil carbon. In: Paul, E.A., et al. (Eds.). *Soil Organic Matter in Temperate Ecosystems: Long Term Experiments in North America*. CRC Press, Boca Raton, FL.

Peat, W.E., 1982. Reproductive losses in faba bean. *Outlook Agric.*, 11, 179–184.

Peoples, M.B., Brockwell, J., Herridge, D.F., Rochester, I.J., Alves, B.J.R., Urquiaga, S., Boddey, R.M., Dakora, F.D., Bhattarai, S., Maskey, S.L., Sampet, C., Rerkasem, B., Khans, D.F., Hauggaard-Nielsen, H., Jensen, B.S., 2009. The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. *Symbiosis* 48, 1–17.

Peterson, G.A., Schlegel, A.J., Tanaka, D.L., Jones, O.R., 1996. Precipitation use efficiency as affected by cropping and tillage systems. *J. Prod. Agric.* 9, 180–186.

Pikul, J.L., Aase, J.K., 1995. Infiltration and soil properties as affected by annual cropping in the northern great-plains. *Agron. J.* 87, 656–662.

Power, J.F., 1990. Legumes and crop rotations, in: *Sustainable agriculture and Temperate zones*. Francis, Ch.A., Flora, C.B., King, L.D., (Eds.). John Willey & Sons, Inc. New York. pp. 178–204.

Power, J.F., Doran, J.W. 1988. Role of crop residue management in nitrogen cycling and use. In: Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen. W.L. Hargrove (Ed.). ASA. Special Publication n° 15. Wisconsin. pp. 101–113.

Probert, M.E., Fergus, I.F., Bridge, B.J., McGarry, D., Thompson, C.H., Russell, J.S., 1987. The properties and managements of Vertisols. C.A.B. International. IBSRAM. U.K.

Rachidi, F., Kirkham, M.B., Stone, L.R., Kanemasu, E.T., 1993. Soil water depletion by sunflower and sorghum under rainfed conditions. *Agric. Water Manage.* 24, 49–62.

Rasmunssen, P.E., Collins, H.P., 1991. Long-term impacts of tillage, fertilizer and crop residue and soil organic matter in temperate semiarid regions. *Adv. Agron.* 45, 93–134.

Ritchie, J. T., Adams, J. E., 1974. Field measurement of evaporation from shrinkage cracks. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 38, 131–134.

Ruselle, M.D., Hesterman, O.B., Shaeffer, C.C., Heichel, G.H., 1987. Estimating nitrogen and rotation effects in legume-corn rotation, in: The role of legumes in conservation tillage systems. J.F. Power (Ed.). *Soil Conserv. Soc. A., Iowa.* pp. 41–42.

Ryan, J., Pala, M., Masri, S., Singh, M., Harris, H., 2008. Rainfed wheat-based rotations under Mediterranean conditions: Crop sequences, nitrogen fertilization, and stubble grazing in relation to grain and straw quality. *Europ. J. Agron.* 28, 112–118.

Sainju, U.M., Lenssen, A., Caesar-Tonthat, T., Waddell, J., 2006. Tillage and crop rotation effects on dryland soil and residue carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70, 668–678.

Saxena, M.C., 1987. Agronomy of chickpea, in: Saxena, M.C., Singh, K.B. (Eds.). *The Chickpea*. CAB International, Wallingford, Oxon, UK, pp. 207–232.

Schwenke, G.D., Peoples, M.B., Turner, G.L., Herridge, D.F., 1998. Does nitrogen fixation of commercial, dryland chickpea and faba bean crops in north-west New South Wales maintain or enhance soil nitrogen?. *Australian J. Experimental Agriculture*, 38, 61–70.

Siddique, K.H.M., Loss, S. P., Regan, K.L., Jettner, R., 1999. Adaptation of cool season grain legumes in Mediterranean-type environments of south-western Australia. *Aust. J. Agric. Res.* 50, 375–387.

Siddique, K.H.M., Sedgley, R, H., Davies, C.L., Puyavirocha, S., 1994. Genotypic differences in chickpea for pod set at low temperature during flowering, in: *International Symposium on Pulses Research*. April 1994. New Delhi. India. Indian Society of Pulses Research and Development. Kanpur, pp. 85.

Sin, G., Petcu, G., Ionita, S., Popa, M., 2000. Influence of soil tillage and sowing technology on sunflower production, in: *Proceedings of the 15th International Sunflower Conference, ISA*. Toulouse, France, Section C, pp. 150–155.

Singh, KB., Malhotra, RS., Saxena, MC., Bejiga, G., 1997. Superiority of winter sowing over traditional spring sowing of chickpea in the Mediterranean region. *Agron. J.* 89, 112–118.

Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., Doran, J., 1998. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 1367–1377.

Shiklomanov, I. A., 1999. *World Freshwater Resources and Their Use*. [http:// webworld. Unesco.Org/water/ihp/db/shiklomanov/index.Shtml](http://webworld.Unesco.Org/water/ihp/db/shiklomanov/index.Shtml).

Soltani, A., Robertson, M.J., Torabi, B., Yousefi-Daz, M., Saparast, R., 2006. Modelling seedling emergence in chickpea as influenced by temperature and sowing depth. *Agric. For. Meteorol.* 138, 156–167.

Soon, Y.K., Clayton, G.W., Rice, W.A., 2001. Tillage and previous crop effects on dynamics of nitrogen in a wheat–soil system. *Agron. J.* 93, 842–849.

Srinivasan, A., Johansen, C., Saxena, N.P., 1998. Cold tolerance during early reproductive growth of chickpea (*Cicer arietinum* L.): characterization of stress and genetic variation in pod set. *Field Crop. Res.* 57, 181–193.

Stephens D., 2002. National Land and Water Resources Audit. National and Regional Assessments of Crop Yield Trends and Relative Production Efficiency. Theme 5.1. Land Use Change, Productivity and Diversification. South Perth: Department of Agriculture of Western Australia.

Reeves, T.G., 1984. Lupin in crop rotation. *Proceeding 3rd International Lupin Conference.* La Rochelle. Francia. Junio 1984. pp. 208–226.

Tanaka, D.L., Anderson, R.L., Rao, S.C., 2005. Crop sequencing to improve use of precipitation and synergize crop growth. *Agron. J.* 97, 385–390.

Tanaka, D.L., Anderson, R.L., 1997. Soil water storage and precipitation storage efficiency of conservation tillage systems. *J. Soil Water Conserv.* 52, 363–367.

Toderi, G., 1987. Lavorazioni: stato attuale delle conoscenze e prospettive. *Esercitazioni dell'Accademia Agraria in Pesaro.* 19, 121–150.

Trapero-Casas, A., Kaiser, W.J., 2007. Differences between ascospores and conidia of *Didymella rabiei* in spore germination and infection of chickpea. *Phytopathology* 97, 1600–1607.

Thompson R., Taylor, H., 1982. Prospect for *Vicia faba* L. in northern Europe. *Outlook Agric.* 11, 127–133.

Thomson, B.D., Siddique, K.H.M., Barr, M.D., Wilson, J.M., 1997. Grain legume species in low rainfall Mediterranean-type environments. *Field Crop. Res.* 54, 173–187.

Turner, N.C., 2004. Agronomic options for improving rainfall-use efficiency of crops in dryland farming systems. *J. Exp. Bot.* 55, 2413–2425.

Unger, P.W., 1994. Residue management strategies-great plains, in: Hatfield, J.L. (Ed.). *Crops Residue Management, Advances in Soil Science*. CRC Press, Inc., Boca Raton, pp. 37–61.

Unkovich, M., Herridge, D., Peoples, M., Cadisch, G., Boddey, R., Giller, K., Alves, B., Chalk, P., 2008. *Measuring Plant Associated Nitrogen Fixation in Agricultural Systems*. ACIAR, Monograph No. Canberra, Australia.

Wang, X.B., Dai, K., Zhang, D., Zhang X., Wang, Y., Zhao, Q., Cai, D.X., Hoogmoed, W.B., Oenema, O., 2011. Dryland maize yields and water use efficiency in response to tillage/crop stubble and nutrient management practices in China. *Field Crop. Res.* 120, 47–57

Wang, X.B., Oenema, O., Hoogmoed, W.B., Perdok, U.D., Cai, D.X., 2006. Dust storm erosion and its impact on soil carbon and nitrogen losses in northern China. *Catena* 66, 221–227.



CULTIVOS  HERBÁCEOS
CROP SCIENCE