

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
AGRÓNOMOS Y MONTES

TESIS DOCTORAL

EFEECTO DEL LABOREO EN EL DESARROLLO
DEL SISTEMA RADICULAR DEL TRIGO, HABAS,
GARBANZOS Y GIRASOL EN UN VERTISOL DE
SECANO

Director: Prof. RAFAEL JESUS LÓPEZ-BELLIDO GARRIDO

Doctorando: JORGE BENÍTEZ VEGA
UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
AGRÓNOMOS Y MONTES

EFFECTO DEL LABOREO EN EL DESARROLLO
DEL SISTEMA RADICULAR DEL TRIGO, HABAS,
GARBANZOS Y GIRASOL EN UN VERTISOL DE
SECANO

Tesis presentada por Jorge Benítez Vega en satisfacción de los requisitos necesarios para optar al grado de Doctor por la Universidad de Córdoba. Dirigida por D. Rafael Jesús López-Bellido Garrido, Profesor Titular de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Huelva y tutorada por D. Luis López Bellido, Catedrático de Producción Vegetal de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y Montes de la Universidad de Córdoba.

El Director de la Tesis:

El Tutor de la Tesis:

Prof. D. Rafael J. López-Bellido Garrido

Prof. D. Luis López Bellido

El doctorando:

Jorge Benítez Vega

Córdoba, julio de 2006

AGRADECIMIENTOS

Quiero dar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas que de una u otra forma han ayudado a elaborar esta Tesis Doctoral, especialmente

al Prof. D. Rafael J. López-Bellido, por la oportunidad brindada y confianza depositada durante estos años;

al Prof. D. Luis López Bellido, por la inestimable y paciente labor de formación que realiza;

al Prof. D. Juan Enrique Castillo, por su orientación y colaboración,

a D. Joaquín Muñoz y D. José Muñoz, por su dedicación insustituible a los trabajos de campo;

a Dña. Pilar Porcel, por su ayuda como secretaria del Dpto. de Ciencias y Recursos Agrícolas y Forestales;

a Dña. Auxiliadora López-Bellido por su disponibilidad y ayuda en la resolución de problemas gráficos.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.	3
SUMMARY	7
ÍNDICE GENERAL	11
1. INTRODUCCIÓN	17
1.1 LA DINÁMICA DEL N EN EL SUELO	17
1.2 EL SISTEMA DE LABOREO	21
1.3 ROTACIONES DE CULTIVO. EL PAPEL DE LAS LEGUMINOSAS	26
1.4 FIJACIÓN BIOLÓGICA DE N ₂	30
1.5 EL SISTEMA RADICULAR	32
1.6 EL MÉTODO MINIRHIZOTRON	44
2. OBJETIVOS	53
3. MATERIAL Y MÉTODOS	57
3.1 LOCALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO	57
3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL	58
3.3 TÉCNICAS Y MATERIAL UTILIZADO	59
3.4 DETERMINACIONES Y ANÁLISIS	61
3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO	68
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	71
4.1 CLIMA	71
4.2 TRIGO	73
4.2.1 Rendimiento	73
4.2.2 Caracterización del sistema radicular	74
4.2.2.1 Extracción manual	74
4.2.2.2 Minirhizotron	79
4.3 GIRASOL	89
4.3.1 Rendimiento	89
4.3.2 Caracterización del sistema radicular	90

Índice general

4.3.2.1	Extracción manual	90
4.3.2.2	Minirhizotron	93
4.4	GARBANZOS	100
4.4.1	Rendimiento	100
4.4.2	Caracterización del sistema radicular	102
4.4.2.1	Extracción manual	102
4.4.2.2	Minirhizotron	104
4.4.3	Aporte de N al sistema	112
4.4.3.1	Fijación de N ₂	112
4.4.3.2	Rizodeposición de N	114
4.5	HABAS	116
4.5.1	Rendimiento	116
4.5.2	Caracterización del sistema radicular	117
4.5.2.1	Extracción manual	117
4.5.2.2	Minirhizotron	121
4.5.3	Aporte de N al sistema	129
4.5.3.1	Fijación de N ₂	129
4.5.3.2	Rizodeposición de N	132
5.	CONCLUSIONES	137
6.	REFERENCIAS	141
	ANEJOS	169

1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

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 fertilizantes, especialmente N, debería ser más bajo, en promedio, considerando la cantidad reciclada, la extracción efectiva y los residuos dejados por los cultivos.

Los efectos del sistema de laboreo y del cultivo de leguminosas sobre el rendimiento del trigo son conocidos en los sistemas de secano de la región Mediterránea, sin embargo se desconocen las causas últimas de dicho efecto. Todo apunta a que existen diferencias importantes en la dinámica y disponibilidad del N. Se desconoce la cantidad de N fijada por las leguminosas (habas y garbanzos) y que cantidad utiliza el cultivo de trigo posterior, esto permitirá afinar la dosis de N fertilizante aplicada al trigo. Las formas en que las raíces de los cultivos aportan N al suelo son diversas, tanto en forma como en lugar y tiempo, desconociéndose la contribución neta de N aportado al cultivo siguiente cuando éstas se encuentran integradas en una rotación. Indudablemente estas lagunas del conocimiento deben dilucidarse mediante un estudio riguroso de la dinámica del N, especialmente del N procedente de la descomposición del sistema radicular.

1.1 LA DINÁMICA DEL N EN EL SUELO

La forma en la que el N llega a las plantas y retorna de nuevo a la atmósfera (única fuente primaria del mismo) es a lo que se denomina “ciclo del nitrógeno”. Éste es muy complejo, debido al gran número de factores que intervienen en el

mismo (climáticos, edáficos y biológicos); por lo que su estudio cuantitativo (pérdidas y ganancias) en un sistema agrícola es muy difícil, y de ningún modo generalizable a ningún otro sistema. Los estudios efectuados por numerosos investigadores y sus idénticas conclusiones no admiten lugar a dudas sobre la veracidad de las distintas etapas del ciclo del N (Mengel y Kirkby, 1982 y Myers, 1982). El N del suelo está sometido a un gran número de procesos microbianos, químicos y físicos. El N disponible por la planta, en un momento determinado, representa sólo una pequeña porción del N total del suelo. Es el resultado neto de los procesos por los cuales el N es transformado (mineralización de la materia orgánica del suelo y de los residuos vegetales) y de los procesos por los que el N es perdido del suelo o se hace no disponible (desnitrificación, pérdidas por volatilización de amonio, inmovilización y lavado). La mineralización de la materia orgánica y de residuos vegetales es un proceso en el que intervienen numerosos microorganismos. Influyen en ella la naturaleza de los residuos orgánicos, la textura del suelo, la temperatura, etc. (Silgram y Shepherd, 1999). La mineralización está controlada en gran parte por el suministro de N del suelo. Las medidas de mineralización, hasta ahora, han estado limitadas a la determinación de las tasas netas, que son la integración de un número de procesos del N del suelo. Las relaciones con el ambiente y los factores de gestión son difíciles, si no imposibles, de determinar, puesto que los factores actúan en otros procesos de interacción, además de participar directamente en la movilización e interacción (Jarvis *et al.*, 1996). La medida de la tasa bruta de mineralización por aplicación de ^{15}N considerando la teoría de dilución del isótopo (Kirkham y Bartholomew, 1954), permite distinguir la mineralización de la inmovilización (Wessel y Tietema, 1992). Según Barraclough (1995) el cálculo de la tasa de mineralización bruta debe ser abordado en función del número de fuentes de suministro de materia orgánica. La aplicación de esta técnica bajo condiciones de laboratorio y campo proporciona la oportunidad de establecer un mecanismo claro de comprensión de cómo la composición de la materia orgánica del suelo y los residuos influyen en el N mineralizado. El proceso de mineralización se divide en varias etapas: aminificación, amonificación y nitrificación (Tisdale y Nelson, 1970). El amonio $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, tras la amonificación, sigue varias rutas alternativas a la nitrificación. Algunas plantas, según las condiciones ambientales o dependiendo de su grado de

desarrollo, pueden absorber directamente $\text{NH}_4^+ - \text{N}$. Las arcillas de tipo expansible fijan ciertas cantidades de $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ en el complejo interlamilar. También, en algunas condiciones determinadas el $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ se volatiliza pasando a la atmósfera en forma de amoníaco. Casi todo el $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ se localiza en la superficie de intercambio catiónico del suelo (complejo arcillo-húmico) y muy poco en la solución del suelo, por lo que las pérdidas por lavado de esta forma son escasas (Fuentes, 1989).

El proceso de nitrificación consiste en la transformación del $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ en nitratos $\text{NO}_3^- - \text{N}$ y consta de dos fases en las que intervienen un grupo de bacterias aeróbicas muy reducido. La primera fase es conocida como nitrificación, en la que se producen nitritos $\text{NO}_2^- - \text{N}$ y la segunda se denomina nitratación, transformándose el $\text{NO}_2^- - \text{N}$ en $\text{NO}_3^- - \text{N}$. En los suelos agrícolas, lo normal es que la velocidad de oxidación del $\text{NO}_2^- - \text{N}$ sea mayor que la del $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, por lo que la presencia del $\text{NO}_2^- - \text{N}$ en la solución del suelo es casi nula. Los nitratos pueden seguir varias rutas, que tendrán más o menos importancia según las condiciones ambientales y edáficas del sistema: extracción por las cosechas, utilización por los microorganismos del suelo (inmovilización y reorganización), lixiviación o lavado a horizontes más profundos y desnitrificación en condiciones anaerobias (Jarvis *et al.*, 1996; Stockdale *et al.*, 1997).

En los climas templados y mediterráneos la aportación de N al suelo procede de la mineralización de la materia orgánica y de los residuos vegetales, de la fijación simbiótica *Rhizobium*-leguminosas, y de los abonos nitrogenados. Los materiales orgánicos son rápidamente descompuestos con temperaturas y lluvias elevadas. Según Hagin y Tucker (1982), en los climas áridos y semiáridos se produce una alta descomposición de los residuos orgánicos; el contenido de materia orgánica es bajo pero su actividad es alta. En las zonas mediterráneas se estima que la velocidad de mineralización de la materia orgánica es del 1-3% (Urbano, 1989). Los Vertisoles son suelos poco aireados, tienen gran cantidad de microporos que le permiten retener bien el agua, pero dificultan la difusión del oxígeno a lo largo del perfil. En ellos el contenido en materia orgánica desciende relativamente poco con

la profundidad, en relación con otros tipos de suelos, lo que puede atribuirse, según Probert *et al.* (1987) a la baja descomposición de las raíces. El tipo de descomposición de los residuos vegetales modifica el equilibrio isohúmico de los suelos y la relación C/N. La paja de los cereales tiene una relación C/N muy alta, lo que hace preciso un aporte de N suplementario para contrarrestar la depresión producida por la inmovilización microbiana del N. Por el contrario su alto porcentaje de materia seca y lignina incrementa la producción de humus.

El uso prolongado de fertilizantes minerales, según Prins *et al.* (1998), contribuye a mantener y elevar los niveles de materia orgánica en el suelo, aumentando su capacidad para mineralizar N, aunque también aumenta el riesgo de pérdidas de NO_3^- -N por lavado. Ello significa que el uso eficiente de N fertilizante mejora la fertilidad del suelo. El lavado de NO_3^- -N tiene lugar, generalmente, durante el otoño, invierno y comienzos de primavera, cuando la cantidad de lluvia excede a la evapotranspiración. Los nitratos en otoño e invierno proceden del N mineral residual en la recolección o de la mineralización del N de los residuos de cultivo o de la materia orgánica del suelo, una vez que ha cesado la extracción del cultivo (Prins *et al.*, 1998). El N residual se incrementa cuando no se alcanza el objetivo de producción por algún factor que limita la eficacia de la absorción de N, como por ejemplo la sequía. Los nitratos del suelo pueden perderse total o parcialmente, según su distribución inicial en el perfil del suelo, la cantidad de lluvia y el tipo de suelo. En los Vertisoles el lavado de NO_3^- -N no es excesivo, aunque las grietas pueden acelerar el movimiento del agua en el subsuelo. En estos suelos suelen darse ascensos de NO_3^- -N por capilaridad en períodos de sequía (Probert *et al.*, 1987). Estudios realizados en Francia con el isótopo ^{15}N (ITCF, 1995) han demostrado que las pérdidas por lavado del N procedente del fertilizante durante el cultivo son muy débiles en el trigo y otros cultivos. El N fertilizante es esencialmente absorbido por el cultivo (50-80%) o incorporado como materia orgánica el suelo (10-25%). La fracción restante que es un promedio de 15% (8-35%) representa las pérdidas totales (gaseosas y por lavado) acumuladas entre la aplicación y la recolección.

En los estudios de balance de N, se asume que las pérdidas de N en los suelos pesados (arcillosos) son dominadas por la desnitrificación, siendo el lavado de $\text{NO}_3 - \text{N}$ menos importante. Ello es atribuible al desarrollo de zonas anaerobias cuando la lluvia abundante produce condiciones reductoras (Vinten *et al.*, 1992). Finalmente, otra vía de pérdidas de N es por volatilización del amonio, que tiene lugar principalmente a través de los fertilizantes que se incorporan al suelo, especialmente si éstos no son enterrados.

1.2 EL SISTEMA DE LABOREO

Hoy día, el sistema de laboreo convencional mediante el volteo es cuestionado en muchas de sus tradicionales ventajas, que empíricamente se han sostenido durante siglos, con la aparición cada vez más intensiva de problemas que afectan a su conservación y fertilidad. 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. 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 en superficie con el fin proteger al suelo 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 suelo seco requiere laboreo con 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 a la degradación de la estructura y a

Introducción

la 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. 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, pero 12 años de estudios realizados por López Bellido y López-Bellido (1999) en suelos arcillosos de la campiña del Guadalquivir no han mostrado una influencia clara del efecto comparativo del no laboreo frente al laboreo convencional respecto del rendimiento del trigo, aunque en años secos parece observarse un ligero incremento de los rendimientos en el no laboreo. Hammel (1995) discrepa de estos resultados afirmando que los rendimientos del trigo son menores en el no laboreo que con laboreo convencional o mínimo laboreo en los suelos arcillosos. Estos resultados sugieren que el uso continuado del no laboreo en suelos de textura fina puede generar condiciones físicas adversas para el sistema radicular, incrementando la impedancia y la densidad aparente en los primeros 30 cm de suelo que dificultaría la penetración de las raíces. Así mismo, el no laboreo en los suelos de textura fina y pobremente drenados genera mayores daños por enfermedades de la raíz y por gusanos de alambre (*Agriotes sp*), aunque la presencia de nematodos es menor que en el laboreo convencional (Probert *et al.*, 1987; Blevins y Frye, 1993; Hammel, 1995).

El cambio de un sistema de laboreo convencional al 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 (Germon y Taureau, 1991; Loomis y Connor, 1992; 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 práctica el no laboreo no existe una mezcla directa de los residuos de cosecha con el suelo, produciéndose un retraso en su descomposición, siendo la tasa de mineralización inferior a la del laboreo convencional, consecuencia de la no alteración de suelo. De cualquier manera, como afirman Probert *et al.* (1987), la influencia de la materia orgánica sobre las condiciones físicas es menos importante en los suelos vertisoles que en otros suelos en los que el contenido en arcilla es menor. Estos autores mencionan el concepto desarrollado de un último nivel estable de materia orgánica asociado a un manejo específico del suelo, donde la retención del rastrojo y el laboreo mínimo puedan incrementar el equilibrio del nivel de materia orgánica.

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 mas elevado y constante. También se observa una acumulación temporal de NH_4^+ -N en los suelos de no laboreo. 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.

En el no laboreo, normalmente todos los fertilizantes, enmiendas y fitosanitarios son aplicados en superficie y no son desplazados en profundidad, a menos que se disuelvan en el agua, por lo que el efecto inmediato es que su concentración y la de materia orgánica vayan disminuyendo drásticamente en las capas más profundas. Por ello, según Loomis y Connor (1992), con nutrientes y crecimiento radicular concentrados cerca de la superficie los cultivos en no laboreo son vulnerables a las deficiencias de nutrientes cuando el suelo se seca, siendo la localización en profundidad del fertilizante una solución efectiva a este problema.

En las regiones templadas, la forma de la curva de respuesta al N en los suelos con no laboreo parece diferir de manera clara de la correspondiente a los de laboreo tradicional. Los primeros rinden menos con aportaciones subóptimas de N, pero igual o más con dosis más altas de N. Para Peoples y Herridge (1990), una cantidad adicional de N fertilizante puede ser requerida para los cereales bajo tratamiento de laboreo reducido para conseguir producciones iguales a las de laboreo tradicional. Ello es debido, además de al riesgo de pérdidas por desnitrificación y lixiviación, al menor contenido de N mineral en el suelo por la mineralización más baja y por la mayor inmovilización, al ser el fertilizante nitrogenado aplicado en superficie donde están los residuos, máxime si éstos son de cereales, que tienen una relación C/N más alta. Diferentes estudios, entre los que destaca el de Germon y Taureau (1991), mencionan la menor eficacia de la urea aplicada en superficie en relación a otros tipos de fertilizantes, el fertilizante nitrogenado más utilizado, al producirse pérdidas por volatilización, variables de entre 0 y 20 %, según las condiciones ambientales. Estas pérdidas no tienen lugar con el enterrado superficial. Sin embargo, en ensayos realizados por López Bellido y López-Bellido (1999) en sistemas de no laboreo y laboreo convencional, no se han observado diferencias significativas en la respuesta del cereal según la modalidad de aplicación (en superficie o enterrado).

Otros efectos pueden derivarse del no laboreo y de la cobertura vegetal en superficie sobre otras propiedades del suelo. Blevins (1986) y Toderi (1987), indican 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

que no se destruyen, dando lugar a una mayor infiltración de agua y aire en los horizontes mas profundos y a la mejora de la estabilidad y tamaño de los agregados. Según Phillips (1986), el rastreo asociado con el laboreo nulo conserva la mayor parte de agua del suelo en regiones climáticas donde la evapotranspiración es elevada. Existe un aumento de la infiltración y reducción de la evaporación debido a que la difusión del vapor de agua a través de la cubierta es más lenta, ralentizándose el proceso, y a 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 es paliada en el no laboreo por las grietas producidas con la sequía, donde el agua de lluvia penetra mas rápidamente, mientras que en laboreo convencional estas grietas se destruyen y además la suela de labor puede constituir un obstáculo importante para la penetración del agua.

En síntesis, el manejo de suelos con 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 mas 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.

1.3 ROTACIONES DE CULTIVO. EL PAPEL DE LAS LEGUMINOSAS

El cultivo continuo de una misma especie en el mismo suelo, también conocido como monocultivo, es una práctica bastante extendida en los sistemas agrícolas, 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. 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. El aumento de las poblaciones de malas hierbas, la mayor proliferación de plagas y enfermedades, el uso menos eficiente del agua y los nutrientes y el descenso de los rendimientos son algunos de los problemas del cultivo continuo de la misma especie. Numerosos trabajos ponen de manifiesto estos inconvenientes y las ventajas y eficacia de las rotaciones de cultivo en diferentes situaciones y sistemas agrícolas (Papastylianou, 1993; Karlen *et al.* 1994, Conway, 1996). 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). No obstante, parece ser que los efectos a largo plazo de la rotación no son tan pronunciados en los sistemas de laboreo de conservación como en el laboreo convencional (Pierce y Rice, 1988).

En el clima mediterráneo el déficit hídrico obliga en muchos suelos 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 su 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 otras plantas (Halvorson y Reule, 1994; Unger, 1994). Asimismo, el sistema cereal-barbecho inutiliza el 50% de la tierra cada año, sin producir cosecha,

presentando riesgos de erosión por la lluvia. El problema está en conocer que nivel mínimo de pluviometría y que tipos de suelo permiten el uso del barbecho y que especies pueden ser introducidas, entre ellas las leguminosas (López Bellido, 1992).

El papel de las leguminosas en las rotaciones de cultivo ha sido revisado por López Bellido (1994) en el marco de la agricultura sostenible. La cantidad de N₂ fijada 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. Según Loomis y Connor (1992), existe un buen conocimiento de factores que afectan a la fijación de N₂ por las leguminosas, pero se sabe poco de la interacción entre estas variables y su efecto sobre el N total disponible. Esta información es esencial para determinar el crédito de fertilidad y el nitrato que las leguminosas aportan al 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. Con la agricultura sostenible ha surgido un renovado interés por las rotaciones de cultivo y su efecto sobre la eficiencia en el uso del N para promover una agricultura productiva, eficiente y estable.

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

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 mejor recuperado 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, que mejora la calidad y fertilidad del suelo.

Muchos de los efectos de las leguminosas sobre las propiedades del suelo se manifiestan a través de su influencia sobre la agregación del suelo y la estabilidad de los agregados (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 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 por el crecimiento de las raíces en profundidad, que disminuyen la densidad del suelo e incrementan la macroporosidad, facilitando la penetración de las raíces del cultivo del cereal siguiente. De igual forma, la presencia de residuos de leguminosas y la ausencia de laboreo aumentan la población de lombrices de suelo (Mackay y Kladivko, (1985). Finalmente, las leguminosas “rompen” el ciclo de las numerosas enfermedades de los cereales (Reeves, 1984; Karlen *et al.*, 1994; Conway, 1996).

La disponibilidad del N inmovilizado en los residuos de las leguminosas por los cultivos siguientes varía ampliamente, dependiendo de numerosos factores. El N de las leguminosas es mineralizado más lentamente y usado más eficientemente que las altas dosis de N químico fertilizante. Trabajos de Hesterman *et al.* (1987), con alfalfa y soja, han demostrado que del 18 al 70% del N de los residuos de las leguminosas fue utilizado por un cultivo siguiente de maíz. En sistemas de no laboreo puede reducirse el N disponible para el siguiente cultivo comparado con un laboreo convencional, el cual incorpora más profundamente los restos de plantas en

el suelo. Igualmente es conocido que las leguminosas también pueden afectar a la disponibilidad de P, cationes y microelementos del suelo. Frecuentemente la profundidad del sistema radicular de las leguminosas utiliza y recicla el calcio del subsuelo y otros nutrientes, afectando a la disponibilidad y utilización de éstos por los siguientes cultivos de grano (Power, 1990).

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 N₂. 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 mas rentable. Si embargo se observan profundos cambios en las políticas agrícolas de muchos países desarrollados como EEUU y la Unión Europea, ante los excedentes estructurales de productos agrícolas alimentarios, tendentes a la extensificación de la producción y al abandono de tierras de cultivo (Set-aside), donde podrían tener mas cabida las leguminosas como fuente de N y cultivo ambientalmente favorable en una agricultura sostenible.

Los beneficios económicos derivados de otras ventajas de las leguminosas en los sistemas de cultivo son muy difíciles de cuantificar, 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. Las leguminosas aportan el «efecto rotación», que incluye todo el incremento del rendimiento del cereal cuando es cultivado 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 solo 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 fototoxicidad, aumento de sustancias promotoras del crecimiento, etc. (Ruselle *et al.*, 1987; 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. 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.

1.4 FIJACIÓN BIOLÓGICA DE N₂

La fijación biológica de N₂ constituye un aspecto clave de la sostenibilidad y producción de alimentos respetuosa con el medio ambiente, así como la productividad de los cultivos a largo plazo (Kessel y Hartley, 2000). La fijación simbiótica del N₂ atmosférico por las leguminosas es el único proceso biológico que puede suministrar cantidades suficientes de N a los sistemas agrícolas para mantener los correctos niveles de N en el suelo y aportar el N demandado por las plantas (Hogh-Jensen *et al.*, 2004).

El proceso de fijación se encuentra influenciado por parámetros abióticos tales como el contenido en N inorgánico en el suelo, la disponibilidad de agua en el suelo o la temperatura del mismo. Además, otros factores bióticos como el genotipo, las tasas de germinación o la intensidad de defoliación van a ser de decisiva importancia (Hogh-Jensen y Schjoerring, 1994; Peoples *et al.*, 2001).

El manejo eficiente de la leguminosa con el objetivo de maximizar sus beneficios depende de una correcta valoración en campo de la fijación de N₂. Valles de la Mora *et al.* (2003), sugieren que una precisa determinación del N fijado simbióticamente por las leguminosas es esencial para determinar el papel de estas especies en la mejora de los agroecosistemas y el mantenimiento de los

niveles de N en el suelo. El problema central para una correcta cuantificación de la cantidad de N fijado es la selección del método estimación adecuado.

Kessel y Hartley (2000) apuntaron que existe un intenso debate acerca del uso de trazadores con ^{15}N para estimar la fijación de N_2 en cultivos en condiciones de campo. El método de la dilución isotópica de ^{15}N mide la extracción de ^{15}N por un cultivo fijador de N_2 comparándolo con un cultivo de referencia que no fija N_2 . El principal punto débil de esta metodología radica en la dificultad para establecer un enriquecimiento con ^{15}N del N mineral del suelo estable en espacio y tiempo.

Las diferencias estacionales en los patrones de acumulación de N por leguminosas y otros cultivos bajo condiciones de campo, así como diferencias en la distribución radicular, pueden conducir a estimaciones erróneas de la fijación de N_2 (López-Bellido *et al.*, 2006). El empleo de diferentes cultivos no fijadores de N_2 como cultivos de referencia también pueden derivar en amplias variaciones de la estimación del N_2 fijado (Danson *et al.*, 1993), por lo que la elección del cultivo de referencia es crucial para los cálculos. El criterio de selección del cultivo de referencia ha sido discutido por Rennie y Dubetz (1986) y Danson (1988), quienes también evaluaron prácticas para reducir los errores en la estimación de la fijación de N_2 . Estos errores pueden ser considerables cuando los niveles de fijación son bajos, pero su influencia es pequeña cuando las tasas de fijación son elevadas.

El método de dilución isotópica con ^{15}N ha sido ampliamente utilizado para cuantificar la fijación de N_2 , pero en los últimos años, el método de la abundancia natural de ^{15}N también ha ganado en popularidad. Este segundo no requiere el costoso fertilizante enriquecido con ^{15}N y proporciona resultados de precisión similar a la obtenida con el método de dilución (Doughton *et al.*, 1995). Esto ha sido posible gracias a los avances tecnológicos en radio isótopos y espectrometría de masas, los cuales pueden detectar pequeñas variaciones en la abundancia natural de ^{15}N en plantas y en suelo. Unkovich y Pate (2000) sugieren que cuando el lugar en el que crecen las leguminosas limita su crecimiento (falta de humedad u otros factores limitantes), la interpretación de los datos obtenidos mediante técnicas de dilución ha de ser sumamente cuidadosa, ya que las cantidades de N marcado

pueden no ser suficientes para suplir las elevadas necesidades en N de la leguminosas. Comparado con el método de la abundancia natural, las técnicas de dilución de ^{15}N pueden ser más fiables cuando se dan altas tasas de fijación de N_2 (López-Bellido *et al.*, 2006), aunque en estudios en condiciones de campo y sistemas no alterados la técnica de la abundancia natural presenta la clara ventaja de no tener que aportar N fertilizante al sistema.

La temperatura y el contenido de humedad del suelo son factores críticos para el crecimiento del Rizobium, así como para la nodulación y procesos de fijación de N_2 . Los suelos en los que se practica el no laboreo ofrecen condiciones excepcionalmente favorables para la simbiosis, tales como menor temperatura y mayor disponibilidad de agua (Souza *et al.*, 2003). Cuando se reduce el laboreo, descienden las tasas de mineralización y nitrificación y aumenta la inmovilización del N, lo que conlleva un descenso en la disponibilidad del N por la planta (López-Bellido *et al.*, 2006). Un laboreo limitado puede incrementar la disponibilidad de agua en el suelo, produciendo un estímulo en la demanda de N y por lo tanto, aumentos en la fijación de N_2 . De acuerdo con Kessel y Hartley (2000), el laboreo de conservación y no laboreo, producen un aumento en la fijación de N_2 al menos hasta que se alcanza el nuevo equilibrio entre el depósito de residuos y la tasa de descomposición.

1.5 EL SISTEMA RADICULAR

1.5.1 LAS RAÍCES Y LA DESCOMPOSICIÓN DE LA MATERIA ORGÁNICA

Las raíces de las plantas interactúan con prácticamente todos los componentes del suelo. Procesos que en gran parte o directamente son influenciados por las raíces y a menudo ocurren en la proximidad de la superficie radicular son comúnmente conocidos como procesos de la rizosfera (Cheng y Kuzyakov, 2005). Estos procesos pueden incluir la producción de raíces a través de su crecimiento y muerte, rizodeposición, respiración radicular y respiración de la microflora presente en la rizosfera a consecuencia de la utilización de los

rizodepósitos por los microbios. Los procesos de la rizosfera juegan un papel importante en el ciclo global del C. Los ecosistemas terrestres están íntimamente ligados al dióxido de carbono atmosférico (CO₂) a través de la fijación fotosintética de CO₂, secuestro de CO₂ en la biomasa y suelo, y la consecuente liberación de C a través de la respiración y descomposición de la materia orgánica. Considerando todo el conjunto y flujo de C dentro del ecosistema, el ciclo del carbono bajo la superficie del suelo esta siendo, cada vez más, reconocido como una de las partes integrantes más importantes (Jackson *et al.*, 1997; Zak y Pregitzer, 1998). El CO₂ efluye desde el suelo como consecuencia de la combinación de dos procesos distintos: respiración en la rizosfera, que incluye la respiración de las raíces y el generado por los microbios en la metabolización de los rizodepósitos, y la descomposición microbiana de la materia orgánica del suelo. Los sustratos para la respiración de la rizosfera proceden del C recientemente fijado en la fotosíntesis, mientras que la descomposición de la materia orgánica del suelo es principalmente función de la actividad heterótrofa de los microorganismos empleando el C del suelo. Estos dos procesos actúan de forma simultánea y están también unidas a través de las interacciones de la rizosfera, las cuales pueden ejercer un efecto estimulativo o depresivo en la descomposición de la materia orgánica (Cheng, 1999; Van Veen *et al.*, 1991).

Estos procesos pueden generar un descenso en la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos del suelo debido a la extracción por las plantas (Schimel *et al.*, 1989), alterando las condiciones físico-químicas en la rizosfera en cantidad de agua, pH, etc. (Jenkinson, 1977), incrementando los sustratos orgánicos como exudados y otros rizodepósitos por parte de los microorganismos de la rizosfera y aumentando la renovación de microorganismos debido al pastoreo de animales (Ingham *et al.*, 1985; Kuikman *et al.*, 1990).

Existe cierta controversia acerca de los mecanismos por los que las raíces afectan a la descomposición de la materia orgánica, resumiéndose en las siguientes hipótesis:

Introducción

- Efectos de desecado
- Destrucción de los agregados
- Competencia por nutrientes
- Empleo de sustratos preferenciales
- Activación microbiana
- Extracción de C

Efectos de desecado

La cabellera radicular es responsable de la extracción de agua por la planta, al tiempo que de la exudación de compuestos orgánicos fácilmente utilizables, por lo que una alta densidad de bacterias están presentes a su alrededor. Por lo tanto, el secado de las partículas de suelo cercanas a la superficie radicular también conlleva el desecado de células microbianas. Un posterior rehumedecimiento puede aumentar la utilización de las células muertas y un incremento en la mineralización de C y N (Van Gestel *et al.*, 1993). De esta manera, los suelos con poca humedad reducen su actividad microbiana y por tanto, disminuye la descomposición de la materia orgánica.

Destrucción de los agregados

Algunos estudios han mostrado que una porción lábil de la materia orgánica del suelo puede ser físicamente protegida de la utilización microbiana debido a la formación de agregados en el suelo (Beare *et al.*, 1994; Elliot, 1986). Si la presencia de raíces vivas fomenta la destrucción de los agregados en mayor proporción que su formación, esta porción de materia orgánica del suelo es más fácilmente atacada por los microorganismos, resultando un incremento en la descomposición de la materia orgánica (Helal y Sauerbeck, 1984, 1986). Sin embargo, esta hipótesis es cuestionada por diferentes autores, como Haynes y Beare (1997), que afirman que las raíces promueven la reorganización de la

estructura del suelo, destruyendo algunos agregados antiguos pero contribuyendo en mayor medida a la formación de otros nuevos.

Competencia por los nutrientes

Cuando las plantas crecen en suelos con bajos niveles de nutrientes se genera una competencia en la extracción de éstos por las raíces de las plantas y los microorganismos, produciéndose un descenso en el crecimiento microbiano que ocasiona un descenso en la cantidad de materia orgánica descompuesta en el suelo. El crecimiento microbiano en la rizosfera está especialmente limitado por la disponibilidad de N (Liljeroth *et al.*, 1990), existiendo una fuerte competencia por las fuentes de N. A corto plazo (de horas a días), los microorganismos pueden capturar amonio NH_4^+ y nitrato NO_3^- de tres a cinco veces más rápido que las plantas (Jackson *et al.*, 1989), pero a largo plazo (de semanas a meses), las plantas pueden extraer mucho más N del suelo, incluso con una fuerte competencia microbiana en la rizosfera.

Empleo de sustratos preferenciales

Aun cuando las plantas son adecuadamente suplementadas con nutrientes minerales, los microorganismos del suelo prefieren el C lábil derivado de la raíz en vez del contenido en la materia orgánica del suelo, reduciéndose la tasa de descomposición de la misma. Sin embargo, si los nutrientes son escasamente aportados, la tendencia se invierte por lo que se incrementa la cantidad de materia orgánica descompuesta por los microorganismos (Cheng, 1999).

Activación microbiana

Las sustancias liberadas por las raíces son fácilmente asimilables por los microorganismos presentes en la rizosfera. Estas sustancias, por tanto, estimulan el

crecimiento microbiano en estas zonas, que puede conducir a un incremento en el metabolismo del carbono aumentando las tasas de descomposición de la materia orgánica (Kuzyakov *et al.*, 2000).

Extracción de C

Si las raíces vivas toman cantidades sustanciales de materia orgánica soluble del suelo, ésta es temporalmente puesta fuera del alcance de los microorganismos, descendiendo la tasa de descomposición de la misma (Reid y Goss, 1983). No obstante, estudios posteriores han revelado que la cantidad de C tomado es inferior al 1% del total de C descompuesto, y que a menudo se encuentra compensada con los exudados de C por parte de la misma (Jones y Kielland, 2002).

1.5.2 LAS RAÍCES Y LA ESTRUCTURA DEL SUELO

Las raíces juegan un importante papel en la formación de agregados en el suelo. La agregación es uno de los procesos incluidos en el desarrollo de la estructura y arquitectura del suelo, y tiene una gran influencia en las propiedades biológicas, hidrológicas y mecánicas del mismo (Goss y Kay, 2005). El crecimiento de las plantas puede verse seriamente retardado si la estructura del suelo no es favorable para la germinación de la semilla o desarrollo de su raíz (Marshall y Holmes, 1988). Las limitaciones para el crecimiento y desarrollo radicular tienen un impacto negativo en la parte aérea de la planta. La estructura del suelo es un compendio de partículas y vacíos que determinan tanto la porosidad para el almacenamiento y transmisión de agua y aire, como el crecimiento y la forma del sistema radicular. Aunque las raíces pueden ejercer una presión de aproximadamente 1.5 a 2 MPa, resistencias relativamente pequeñas pueden disminuir la tasa de crecimiento de la raíz (Goss y Russell, 1980; Bengough y Mullins, 1990), y es que las raíces sólo crecen sin restricciones en poros de diámetro superior al suyo. Una reducción en la elongación provoca generalmente un incremento en el diámetro radicular (Wilson *et al.*, 1977). Que una raíz pueda

crecer dentro de un agregado depende no sólo de la presencia de poros de adecuado diámetro y baja resistencia a la penetración sino también del ángulo de contacto de la raíz con la unidad estructural de suelo (Dexter y Hewitt, 1978).

Además de los cambios morfológicos que pueden ser inducidos por el crecimiento de las raíces en suelos con pobre estructura (aquellos que están formados por partículas independientes entre si), existen cambios fisiológicos que también son muy importantes (Goss y Kay, 2005). Entre estos se incluyen un incremento en la liberación de exudados (Marchner, 1995) y el aumento de las ramificaciones laterales (Goss, 1977). El extremo de las raíces es la principal fuente de liberación de compuestos orgánicos al suelo. Además son el origen de las hormonas de la planta que indican a la parte aérea acerca de las condiciones de humedad y mecánicas en el suelo (Gowing *et al.*, 1990). Los cambios en la ramificación lateral y exudación son probablemente los más importantes en términos de interacción entre las raíces y la estructura del suelo. Según Goss (1991), las etapas del crecimiento radicular (elongación, engrosamiento, renovación de células, muerte y decaimiento de las unidades radiculares) y sus funciones (anclaje, almacenaje, extracción de agua y nutrientes, liberación de compuestos orgánicos e inorgánicos) interactúan para cambiar las condiciones del suelo. Muchas de las modificaciones de las condiciones del suelo conllevan cambios en la estructura del mismo.

Tisdall y Oades (1982) sugirieron que los productos de los microorganismos del suelo contribuyen a la formación y estabilidad de unidades de 2 μm de diámetro o mayores, mientras que raíces e hifas de hongos son importantes para aquellos procesos en agregados con un diámetro efectivo mayor de 200 μm . Mucílago, liberados por el ápice y la epidermis radicular, unen residuos de partículas orgánicas con fragmentos minerales. Los microorganismos en la rizosfera utilizan los mucílago liberados por las raíces como sustrato para su propio crecimiento, y liberan sus propios mucílago que estabilizan los agregados más finos, actuando como sustancia cementante.

La estructura del suelo puede ser estudiada desde un amplio rango de escalas, desde lo microscópico hasta el nivel de la totalidad del perfil, encontrando unidades estructurales que varían desde 0.2 μm hasta 1 m o más. Sin embargo, al margen de escalas, la estructura del suelo constituye un sistema cuasi-estable y muy dinámico, donde los agregados se forman y destruyen continuamente.

1.5.3 RIZODEPOSICIÓN

Las raíces de las plantas interactúan con la materia orgánica del suelo y los organismos en la rizosfera. Estas interacciones son principalmente dirigidas por la rizodeposición, la cual consiste en la liberación por las raíces de compuestos de N y C de bajo y alto peso molecular solubles en agua (Kuzyakov 2002), incluyendo restos de raíz en descomposición y raíces muertas (Rovira *et al.* 1979).

La rizodeposición de N en el suelo durante el crecimiento de las leguminosas es un importante proceso para el entendimiento no solo del ciclo del N en el suelo (Mayer *et al.*, 2003) sino también para el cálculo de los balances de N en el campo (McNeils *et al.*, 1998), y la predicción de los efectos beneficiosos del N de las leguminosas a los cultivos sucesivos en sistemas agrícolas basados en las rotaciones con leguminosas (Russell y Fillery, 1996a). La reserva de N bajo el suelo la componen macro raíces visibles y los materiales derivados de la raíz, los cuales son perdidos en el suelo durante el crecimiento de la planta, que se definen como rizodepósitos.

La mayoría de las interacciones que se producen en las raíces tienen efectos de corta duración (horas o días) y tienen importantes implicaciones en la disponibilidad de nutrientes para la planta. Los mecanismos de movilización de nutrientes, por ejemplo, la bajada del pH en la rizosfera o la formación de iones complejos mediante el exudado de ácidos orgánicos son bien conocidos (Jones, 1998). El C y N libremente disponibles activan e incrementan la biomasa microbiana. Esta activación y el suficiente aporte de C pueden originar un fundamental efecto positivo en la materia orgánica del suelo y mineralización del

N, y contribuir a la nutrición de N (Zagal 1994; Kuzyakov 2002). La rizodeposición de C puede ser muy sustancial pudiendo depositarse entre 20 y el 50% del C fijado durante la estación de crecimiento (Whipps y Lynch, 1985; Cheng *et al.* 1993). Adicionalmente sustanciales cantidades de N pueden ser depositadas junto con C (Curl y Truelove, 1986; Janzen, 1990; Janzen y Bruisma, 1993).

La mayoría de la rizodeposición de C es respirada durante el crecimiento de la planta (Hütsch *et al.*, 2002). A diferencia de esto, la rizodeposición de N permanece en el suelo y contribuye al aporte de N para la planta. En estudios con cereales, del 10 a 23% del N total de la planta se encontró en los rizodepósitos (Jensen 1996; Rroco y Mengel 2000), del 36 a 38% en rotaciones con trébol (Hogh-Jensen y Schjoerring 2001) y 7 a 19% con leguminosas de grano (Jensen 1996; Russell y Fillery 1996b). Janzen (1990) y Jensen (1996) encontraron una mineralización de los rizodepósitos entre 23 y 38 % en experimentos de incubación de corta duración (15 y 11 semanas). De este modo la rizodeposición de N puede contribuir de forma significativa al ciclo del N después de cosecha en un agroecosistema.

En un estudio complementario, Mayer *et al.* (2003a) investigaron la cantidad de N rizodepositado de tres especies de leguminosas de grano y encontraron entre un 12 y 16% del N total de la planta como rizodeposición en el suelo, principalmente inmovilizado en la biomasa y residuos microbianos. Los residuos microbianos, definidos como exoenzimas microbianas, sustancias mucosas y microorganismos muertos (Joergensen *et al.* 1995), pueden ser, debido a su naturaleza, una importante reserva de nutrientes de fácil descomposición. De Neergaard y Magid (2001) encontraron una re-asimilación de los residuos microbianos por los microorganismos de la rizosfera. Por lo tanto, la consideración del pool de los residuos microbianos como un pool separado de la materia orgánica del suelo es de interés específico para los procesos del N residual en el suelo.

Los compuestos depositados tienen un mayor efecto en la densidad y actividad de microorganismos en la rizosfera y por lo tanto, en el ciclo y disponibilidad de los nutrientes en la rizosfera. Tras la mineralización, los nutrientes contenidos en los compuestos rizodepositados estarán sujetos a la

extracción por plantas y microorganismos, absorción a partículas del suelo o pérdidas del sistema suelo-planta. Consecuentemente, la rizodeposición siempre será medida como un resultado neto de varios procesos interactivos.

Varias aproximaciones experimentales han sido hechas para cuantificar la rizodeposición de N de leguminosas en cultivos de arena (Virtanen y Laine, 1935), en soluciones de cultivo (Ta *et al.*, 1986) y en mezclas de suelo con arena de río (Khan *et al.*, 2002) para estimar el incremento del N en el sustrato durante el crecimiento de la leguminosa. Debido a las variaciones espaciales del contenido en N del suelo y la baja cantidad de N rizodepositado comparado con el N total del suelo, un cambio en el contenido de N del suelo originado por el crecimiento de las leguminosas es difícil de determinar incluso cuando se emplean técnicas analíticas que pueden determinar pequeñas diferencias en el porcentaje de N del suelo. Una mas directa determinación del “pool” bajo tierra de N derivado de las plantas y el consecuente ciclo del N orgánico durante la estación de crecimiento requiere el marcado con ^{15}N de las plantas (Hood *et al.*, 1999). Las técnicas de marcado deben incorporar uniformemente el ^{15}N en los tejidos y órganos.

A consecuencia de esto, diferentes métodos basados en el ^{15}N han sido desarrollados para estimar la rizodeposición del N derivado de la leguminosa en el suelo. Una técnica de alimentación foliar con ^{15}N (McNeill *et al.*, 1997) y una técnica de dilución de ^{15}N en el suelo (Lory *et al.*, 1992) han sido desarrolladas tanto para macetas como para estudios en campo, mientras que técnicas con ^{15}N en cabinas de crecimiento (Ross *et al.*, 1964), alimentación con ^{15}N a través de los tallos (Russell y Fillery, 1996b) y técnicas para el marcado de la mitad del sistema radicular de una leguminosa (Sawatsky y Soper, 1991) han sido diseñadas para experimentos en macetas únicamente. Empleando las técnicas de marcado con ^{15}N , tanto el sistema radicular de la leguminosa como los rizodeósitos quedarán marcados con ^{15}N , por lo que la rizodeposición de N provoca un enriquecimiento de ^{15}N del suelo circundante. En la cosecha de la leguminosa, la proporción de N del suelo derivado de la rizodeposición (Pndfr) puede ser calculado dividiendo el exceso en ^{15}N del suelo en el que ha sido cultivada la leguminosa marcada entre el exceso de ^{15}N de las raíces gruesas recuperadas de la leguminosa (Sawatsky y

Soper, 1991). Las raíces gruesas son las raíces visibles y fragmentos de raíces que pueden ser recogidas mecánicamente del suelo. Incrementando el enriquecimiento en ^{15}N tanto de las raíces gruesas como de los rizodepósitos se mejora la oportunidad de una medición precisa de la rizodeposición de N.

Dependiendo de las condiciones del suelo que prevalezcan y de las especies de plantas, efectos negativos también han sido observados (Merckx *et al.* 1985; Wang y Bakken 1997; Bottner *et al.* 1999; Kuzyakov 2002). La rizodeposición puede afectar la materia orgánica del suelo y la relación con los proceso de “turnover” de larga duración (semanas y meses). La rizodeposición puede contribuir a una mayor estabilidad de los agregados (Traeré *et al.*, 2000; Hütsch *et al.*, 2002), pero en contraste, también puede producir el efecto contrario, con estabilidad disminuida y disrupción de los agregados en la rizosfera (Reid y Goss, 1981; Helal y Sauerbeck, 1989). Adicionalmente, aparte de una alteración del tamaño y la actividad, algunos autores han informado de una alteración específica planta-especie de la composición de la microflora del suelo en la rizosfera comparado con el resto del suelo (Miethling *et al.* 2000; Smalla *et al.* 2001).

1.5.4 EL PAPEL DE LAS RAÍCES FINAS

El sistema radicular es el principal medio de anclaje y absorción de agua y nutrientes del que disponen las plantas, y puede llegar a consumir más de la mitad del carbono fijado anualmente por las plantas (Vogt, *et al.*, 1986; Hendrick y Pregitzer, 1993). A pesar de su obvia importancia, la dinámica de las raíces vivas es poco conocida, debido a la inaccesibilidad del sistema radicular. Durante años, se ha considerado que nuestro conocimiento sobre las raíces, (el cual ha sido aplicado globalmente al manejo de los sistemas de plantas), ha estado basado en unas falsas premisas de simplicidad (Wells y Eissenstat, 2001; King *et al.*, 2002; Pregitzer, 2002; Pregitzer *et al.*, 2002; Zobel 2003; Hodge, 2004). Según Pregitzer (2002), nuestro conocimiento y entendimiento de las raíces finas, su longitud y diámetro, diversidad estructural y funcional, complejidad, longevidad y periodos de renovación, son probablemente aún muy deficientes.

Para Zobel (2003), no existen definiciones concretas sobre las dimensiones, funciones y fisiología de las raíces finas. Es cierto que tanto en plantas anuales como en perennes, las raíces menores de 1 mm de diámetro constituyen un sistema estructural y funcional complejo, el cual es el componente dominante del sistema radicular. Al tiempo que es conocido que las raíces finas aportan la mayor parte de la longitud radicular, también se afirma que a menudo es subestimado a causa de su pequeño tamaño y su color cercano a la transparencia (Costa *et al.*, 2001). Evidencias de este hecho han sido ampliamente aportadas. Paulychenko (1937) encontró que, dependiendo del grado de competencia entre plantas, la longitud radicular de cebada y trigo estaba formada en un 45-93 % por raíces secundarias menores a 0.1 mm de diámetro. En un estudio cuantitativo detallado de las raíces del centeno, Dittmer (1937) reportó que más del 99 % del sistema radicular estaba constituido por las raíces secundarias y terciarias, las cuales alcanzaban unos diámetros medios de 0.13 y 0.12 mm respectivamente. Koistra *et al.* (1992) observó que, dependiendo de la densidad del suelo, las raíces menores de 0.2 y 0.3 mm de diámetro podían abarcar más del 40 y 80 % de la longitud radicular desarrollada por plantas de maíz respectivamente. Según Moran *et al.* (2000), el 80 % de la longitud radicular del trigo se debe a raíces menores a 0.3 mm de diámetro.

1.5.5 MÉTODOS DE ESTUDIO DEL SISTEMA RADICULAR

Debido a la inaccesibilidad del sistema radicular, se requieren técnicas especiales para la observación y el estudio de las raíces. Los principales métodos utilizados para medir la longitud y biomasa radicular pueden ser clasificados como:

- Métodos de extracción (generalmente conocidos como root washing)
- Técnicas de “mapping”
- Técnicas de imágenes *in situ*
- Otras técnicas de imágenes, a menudo muy sofisticadas para trabajar en campo

Métodos de extracción

Los métodos de extracción están basados en la recogida de muestras de suelo de un volumen conocido (cilindros o monolitos), de las cuales las raíces son físicamente separadas mediante un lavado cuidadoso, retirando el suelo. Finalmente, se mide la longitud de las raíces separadas empleando alguna técnica esteorológica (Newman, 1966) o de análisis de imágenes (do Rosario *et al.*, 2000).

Técnicas de “mapping”

El principio de los métodos de mapping consisten en registrar la frecuencia de contacto de las raíces en una superficie de suelo expuesta a la vista y realizada de forma destructiva (van Noordwijk *et al.*, 2000). Los contactos de las raíces, tanto si son enumerados en la superficie excavada o en una fina lamina de suelo empleando el microscopio, son posteriormente convertidas en medidas de longitud en base a una calibración realizada previamente.

Toma de imágenes *in situ*

En los métodos basados en la toma de imágenes *in situ* (que implican principalmente la reflexión de la luz en los objetos observados), las raíces son estudiadas mediante la observación directa de las mismas a través de objetos transparentes, tales como las paredes de tubos de material plástico transparente introducidos en el suelo durante varios meses (conocidos como minirhizotron) (Smit *et al.*, 2000). Esto permite una monitorización dinámica del crecimiento de la raíz y obtener medidas de la longitud radicular tanto de forma directa como por otros procedimientos que implican la calibración previa con algún método destructivo.

Otras técnicas de imágenes

Otros métodos de estudio basados en el análisis de imágenes implican el empleo de sondas (empleando radiaciones electromagnéticas como luz, rayos X, rayos γ , rayos de partículas o campos magnéticos variables), en muestras tomadas en campo o en sistemas radiculares completos de plantas cultivadas en contenedores de volúmenes definidos (el tamaño es función de la técnica a emplear). El resultado es la reconstrucción de imágenes en dos dimensiones (empleando radiografía de rayos X) o en tres dimensiones (escaneo con rayos X CAT, NMRI), de las cuales se obtienen un amplio rango de medidas de la raíz empleando los métodos de tratamiento de imágenes adecuado (Moran *et al.*, 2000; Pierret *et al.*, 2003).

1.6 EL MÉTODO MINIRHIZOTRON

Según la definición dada por Brown y Upchurch (1987), el sistema minirhizotron es un conjunto de componentes que visualmente, fotográficamente o cualquier otro procedimiento se capaz de tomar imágenes del normal crecimiento de las raíces de las plantas dentro del suelo. Una gran variedad de sistemas han sido empleados para observar las raíces y obtener imágenes de la mismas, desde periscopios (Richards, 1984), cámaras a color en miniatura (Hendrick y Pregitzer, 1993b), hasta sistemas de digitalizado de imágenes (escáners).

Actualmente, un sistema de minirhizotron consiste en un tubo de material transparente que ha sido insertado en el suelo, un sistema para la captación de imágenes (cámara o escáner) y un monitor que permita visualizar las imágenes obtenidas.

1.6.1 EL TUBO MINIRHIZOTRON

El tubo empleado en el sistema suele ser cilíndrico y rígido, aunque otros modelos de tubos han sido ensayados por diversos autores (Johnson *et al.*, 2001). La superficie del tubo es colocada en contacto directo con el suelo, permitiendo el normal crecimiento de las raíces hasta el contacto con el mismo. Los materiales de fabricación varían desde Plexiglás®, policarbonato, acrílico o cristal. Según Brown y Upchurch (1987), el material empleado no afecta al crecimiento radicular, por lo que la elección del material estará en función de las cualidades resistencia-transparencia-precio. La parte del tubo que queda en el exterior del suelo debe ser recubierta con pinturas que reflejen la luz para reducir en la medida de lo posible las fluctuaciones térmicas en el interior del tubo, las cuales podrían afectar al crecimiento de la raíz a lo largo del mismo (Levan *et al.*, 1987).

1.6.1.1 INSTALACIÓN EN EL SUELO

Se deben tener en cuenta dos principios básicos en la colocación, que son:

- 1) la instalación debe perturbar lo menos posible el entorno del tubo, evitando crear zonas de compactación alrededor que modificarían el patrón de crecimiento, y
- 2) se debe conseguir el mayor contacto posible entre el tubo y el suelo, evitando la formación de cámaras de aire que originarán burbujas y gotas de condensación.

El comportamiento de la raíz al encontrarse el tubo ha de ser similar a si encontrara una roca o cualquier otro objeto de similares dimensiones. El procedimiento habitualmente empleado para introducir el tubo es practicando previamente un agujero con una sonda de igual diámetro e introduciendo después el tubo a través del mismo.

Aun cuando los minirhizotron son instalados con el mayor cuidado, ciertas perturbaciones se producen en el entorno del mismo que pueden afectar al normal desarrollo esperado de las raíces en ese punto, por lo que se guardan tiempos de espera entre la instalación y la toma de imágenes conocidos como periodos de retorno al equilibrio. Cuando este método es empleado en ecosistemas naturales, los investigadores han empleado periodos de retorno al equilibrio muy diversos, oscilando entre periodos de espera nulos (López *et al.*, 1998), semanas (Weber y Day, 1996), meses e incluso años (Kloeppel y Gower, 1995; Majdi y Kangas, 1997). Cuando los minirizotron son empleados en sistemas agrícolas, la colocación del tubo debe realizarse inmediatamente después a la siembra de los cultivos, si se pretende obtener datos de todo el ciclo de crecimiento radicular con una adaptación tubo-suelo previa satisfactoria. El patrón de crecimiento puede verse afectado incluso meses después de la colocación del tubo (Volkmar, 1993), por lo que será necesario comprobar si las lecturas realizadas a lo largo del tubo son típicas de la totalidad del suelo.

El ángulo de inclinación utilizado en la colocación puede variar desde totalmente horizontal hasta la completa verticalidad, incluyendo una gran variedad de ángulos intermedios (Johnson *et al.*, 2001). Los tubos instalados con cierto ángulo sobre la vertical aportan mayor información acerca de la distribución de las raíces a lo largo del perfil (Dubach y Russelle, 1995), a la vez que son más sencillos de instalar. Los ángulos más comúnmente empleados son 30° y 45° sobre la vertical (Johnson *et al.*, 2001). Cuando el tubo es colocado con una inclinación cercana a la verticalidad facilita el crecimiento de las raíces a lo largo del mismo, ya que encuentran menor impedancia al avance, por lo que se produce una sobreestimación en todas las medidas realizadas.

1.6.2 ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

1.6.2.1 FRECUENCIA DE MUESTREO

Según Taylor (1997), quien realizó una revisión de todos los estudios con minirizotron hasta la fecha, determinó que la frecuencia de muestreo va a depender

de los parámetros radiculares que estén siendo medidos. Así como sólo una medida es necesaria para caracterizar la profundidad máxima alcanzada por el sistema radicular, múltiples observaciones serán necesarias para estudiar la dinámica de crecimiento del mismo sistema.

Los intervalos de muestreo pueden ser semanales (Black *et al.*, 1998), cada dos semanas (Thomas *et al.*, 1999), mensualmente (Weber y Day, 1996) o periodos más largos que pueden alcanzar seis u ocho meses. Numerosos estudios se han llevado a cabo para determinar intervalos óptimos de muestreo, estando éstos en clara dependencia de la especie vegetal a estudiar. Según Johnson *et al.* (2001), como norma general intervalos superiores a ocho semanas conducen a una subestimación acusada de las propiedades de la dinámica radicular, ya que numerosas raíces finas pueden aparecer y morir entre dos muestreos sin que sean registradas. Un intervalo de muestreo entorno a dos semanas reduce las subestimaciones a niveles aceptables en la mayoría de los casos de estudio.

1.6.2.2 INTERPRETACIÓN DE LAS OBSERVACIONES

El fin último del estudio con minirizotron es obtener datos acerca del sistema radicular que sean de la mayor calidad para avanzar en el estudio del crecimiento, demografía y dinámica radiculares. Sin embargo, el sistema presenta limitaciones, sobre todo cuando las raíces a estudio superan los 2 mm de diámetro, por lo que el estudio de las raíces finas debe ser el principal objeto de uso de este método.

La longitud radicular es uno de los parámetros más importantes y más ampliamente utilizados para describir los sistemas radiculares (especialmente el comportamiento de las raíces finas) y predecir su respuesta a cambios en el ambiente. El ratio longitud/masa radicular también es ampliamente empleado como indicador de la morfología de las raíces finas (Robinson Y Rorison, 1983; Fitter, 1985). La longitud radicular suele expresarse como longitud por fragmento de

Introducción

estudio o longitud por tubo, en cm o m de raíz por cm² o m² de tubo. El área radicular también constituye una medida habitual, expresada en cm² o m² de raíz por cm² o m² de tubo.

Diferentes aproximaciones teóricas han sido realizadas con el objetivo de convertir parámetros radiculares como longitud o área radicular a unidades de volumen. La conversión más aceptada y empleada, propuesta por Merrill y Upchurch (1994) y modificada por Merrill *et al.* (1994) asume que la longitud radicular de todas las raíces alrededor del fragmento son observadas con una profundidad de campo de observación comprendido entre 2 y 3 mm (Steele *et al.*, 1997), donde la longitud radicular por unidad de volumen se obtiene de la siguiente expresión:

$$RLDv = \frac{L}{A \times DOF}$$

Donde:

RLDv: volumen radicular o densidad radicular volumétrica (m m⁻³)

L: longitud radicular en el fragmento de estudio (m)

A: área total del fragmento de minirizotron observado (m²)

DOF: profundidad del campo de observación (m)

Este volumen radicular puede ser expresado en unidades de superficie del suelo (RLDa) multiplicando RLDv por la profundidad a la que se hizo el muestreo (D) en m, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$RLDa = RLDv \times D$$

La conversión de la densidad volumétrica a biomasa de raíz bajo el suelo es posible realizarla cuando se conoce el peso específico de raíz de cada clase (en función de su diámetro). El peso específico de raíz varía ampliamente, por lo que es calculado mediante la obtención de un número determinado de cilindros de suelo (Johnson *et al.*, 2001), y posteriormente son introducidos en la siguiente expresión:

$$RBDv = \sum_i \frac{RLD_i}{SRL_i}$$

Donde:

RBDv: densidad volumétrica de biomasa radicular (g m^{-3}).

RLD_i : densidad volumétrica de raíz (m m^{-3}) para diámetro de clase i .

SRL_i : longitud específica de raíz (m g^{-1}) para diámetro de clase i .

1.6.3 RELACIONES ENTRE MÉTODOS DE ESTUDIO DEL SISTEMA RADICULAR

Está bien documentado que los resultados obtenidos con todas estas técnicas son altamente variables (coeficiente de variación superiores al 100% en datos de minirizotron y lavado manual), y que los resultados obtenidos por dos técnicas diferentes, en la mayoría de los casos, son difícilmente comparables entre sí. Kucke *et al.* (1995) comparó los métodos de extracción “core break”, observación en zanjas, y extracción de cilindros y monolitos. Éstos encontraron buenas correlaciones entre la extracción de cilindros y monolitos, pero con resultados variables entre “core break” y observación en zanjas, estando los resultados de los dos últimos escasamente relacionados con los resultados de los dos primeros.

Heeraman y Juma (1993) encontraron coeficientes de variación mas bajos cuando se empleaban monolitos (4500 cm^3) que con cilindros (754 cm^3). Dichos autores interpretaron las diferencias entre las técnicas de “mapping” y las técnicas destructivas como:

- 1) Las raíces tienen una orientación preferencial.
- 2) Las diferencias en la visibilidad de las raíces dependen del contraste de la matriz del suelo.

En función de esto, podría ser algo precipitado rechazar la posibilidad de que los resultados obtenidos a través de una técnica puedan reflejar los procesos reales de la raíz, como la proliferación en respuesta a diferentes concentraciones de nutrientes (Caldwell *et al.*, 1992; Hodge, 2004). Sin embargo, la regularidad con la cual las medidas de la longitud radicular parecen variar depende de la técnica usada, así como la metodología y planteamiento científico con los que los experimentos de estimación de raíces son afrontados.

La definición del objeto de estudio (las raíces en general, y las finas en particular), es todavía objeto de debate (Pregitzer *et al.*, 2002; Zobel, 2003), porque se desconoce en gran medida cómo están organizadas las raíces y cómo actúan dentro del sistema radicular. Actualmente se estudian de acuerdo a una clasificación arbitraria de tamaños (diámetros), ya que es conocida la relación existente entre el diámetro y la absorción de nutrientes (Fitter, 1991, 1996; Yanai *et al.*, 1995).

2. OBJETIVOS

2. OBJETIVOS

Los objetivos fundamentales de la presente tesis fueron:

- Estudiar la influencia del sistema de laboreo (no laboreo y laboreo convencional) en el desarrollo radicular del trigo, habas, garbanzos y girasol.
- Cuantificar el aporte de N radicular de tales cultivos, con especial énfasis en N aportado por las leguminosas a través del estudio de la fijación biológica y la rizodeposición.
- Desarrollar y calibrar un sistema de análisis de raíces continuo y no destructivo (Minirhizotron) a través de la utilización de los métodos tradicionales de muestreo y extracción manual de raíces.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.MATERIAL Y MÉTODOS.

3.1 LOCALIZACIÓN DEL EXPERIMENTO

El experimento de campo se ha realizado 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 son los siguientes:

- Temperatura media anual: 17.5 °C
- Temperatura media del mes mas frío: 9.5 °C
- Temperatura media del mes mas cálido: 27.5 °C
- Duración media del periodo de heladas (según criterio de L. Emberger): 3-4 meses
- ETP media anual: 1000 mm
- Precipitación media anual: 550-750 mm
- Déficit medio anual: 600 mm
- Duración media del periodo seco: 4-6 meses
- Precipitación de invierno: 200-300 mm (39 %)
- Precipitación de primavera:150-200 mm (29 %)
- Precipitación de otoño: 150-200 mm (29 %)

3.1.2 CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

El suelo es un característico Vertisol de la campiña media del Guadalquivir (Typic Haploxererts). Éstos 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 3.1.

Tabla 3.1. 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 lleva 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 (split-splitplot) con cuatro repeticiones. 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 x 5 m). Cada año del presente estudio se incluyeron en el interior de las correspondientes parcelas de habas y garbanzos microparcels de 1 x 2 m donde se aplicará el N marcado (¹⁵N) para la estimación de la fijación de N₂, así como los marcos de acero necesarios para el estudio de la rizodeposición de N por las leguminosas.

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 son dejados en el suelo, permaneciendo como “mulching” y en el laboreo convencional son incorporados al suelo. La parcela de barbecho permanece 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 3.2.

Material y Métodos

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 efectúa 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.

Tabla 3.2. 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 de Noviembre	180
Habas (<i>Vicia faba</i> L.)	Alameda	Noviembre	190
Garbanzos (<i>Cicer arietinum</i> L.)	Pedrosillano	Febrero	100
Girasol (<i>Helianthus annuus</i> L.)	Sanbro	Febrero	4

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-metilnilina] 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

Debido a la heterogeneidad de las condiciones climáticas acaecidas durante los años de estudio (2003-04 y 2004-05), no todas las determinaciones y ensayos pudieron ser realizados en todos los cultivos, bien porque no se registraron las precipitaciones suficientes como para instalar los dispositivos en campo, o bien porque los cultivos no llegaron a término de manera normal, originando datos poco fiables. Todas las determinaciones y medidas fueron realizadas en las parcelas de dosis 100 kg N ha^{-1} por considerarse la cantidad óptima en estas condiciones, ya que no se produce un aumento de los rendimientos a dosis superiores a la indicada (López-Bellido y López Bellido, 2001). El trigo estudiado correspondió a las parcelas de la rotación trigo-girasol, por ser la más afectada en la extracción de agua por el cultivo precedente. A continuación se detallan las determinaciones y ensayos que se realizaron en cada año de estudio.

Campaña 2003-04

- Rendimientos: trigo, habas y girasol
- Fijación de N_2 : habas y garbanzos (abundancia natural ^{15}N y dilución ^{15}N)
- Rizodeposición: habas y garbanzos
- Estudio del sistema radicular: trigo, habas, garbanzos y girasol (lavado manual y escáner radicular)

Campaña 2004-05

- Rendimientos: trigo, habas, garbanzos y girasol
- Fijación de N_2 : habas (abundancia natural ^{15}N) y garbanzos (abundancia natural ^{15}N y dilución ^{15}N)
- Estudio del sistema radicular: trigo y habas (lavado manual)

3.4.1. RENDIMIENTO DE GRANO

Para la determinación del rendimiento de grano se cosechó una superficie de 30 m^2 ($3 \times 10 \text{ m}$) de cada parcela de la dosis 100 kg N ha^{-1} , en todos los cultivos de las rotaciones trigo-habas, trigo-garbanzos, trigo-girasol dejando 1 m de borde a cada

lado. La recolección se efectuó con la cosechadora de ensayos “Nuserymaster elite” de 1.5 m de anchura de corte a principios de junio.

3.4.2 ESTUDIO DE LA FIJACIÓN BIOLÓGICA DE N₂ POR LAS LEGUMINOSAS (HABAS Y GARBANZOS)

La determinación de la fijación de N₂ atmosférico por las leguminosas se realizó mediante la aplicación de dos metodologías basadas en el uso del ¹⁵N por la planta y posterior determinación del mismo en laboratorio.

3.4.2.1 Método de dilución isotópica de ¹⁵N

Para estimar la cantidad de N₂ atmosférico fijado por las leguminosas empleando el método de la dilución isotópica, se instalaron microparcels de 1 x 2 m en el interior de las parcelas de habas y garbanzos correspondientes a las dosis de 100 kg N ha⁻¹ aplicados siempre al trigo. En dichas microparcels se aplicó tras la siembra N marcado (¹⁵N) a una dosis única de 10 kg N ha⁻¹. El N marcado aplicado también fue en forma de nitrato amónico del 33.5%, con un enriquecimiento del 2.5% de exceso de ¹⁵N. Se incorporó al suelo disuelto en 4000 ml de agua destilada por microparcels, distribuyéndolo uniformemente por la misma con la ayuda de un pulverizador manual de gota gruesa. Para evitar la contaminación con ¹⁵N de suelos y plantas cercanas se siguieron estrictamente las medidas recomendadas por Powlson y Barraclough (1993). La planta de referencia empleada fue el trigo correspondiente a las subparcelas de igual rotación con la leguminosa y a la dosis de 100 kg N ha⁻¹, donde también microparcels de 1 x 2 m fueron establecidas, y en las cuales una dosis de 100 kg N ha⁻¹ marcado con ¹⁵N fue aplicado inmediatamente después de la siembra. Las plantas del interior del área de muestreo (0.5 m²) fueron cosechadas en maduración. Todo el material vegetal muestreado fue secado a 70 °C durante al menos 48 horas, triturado y homogeneizado. La abundancia isotópica de ¹⁵N y el contenido total de N fueron determinados empleando técnicas de espectrometría de

masas I.R.M.S. (Delta Plus XL) y combustión seca de Dumas (Eurovector mod. Euro 3011) respectivamente.

Para la determinación del porcentaje del N de la planta proveniente del aire (%Ndfa) se emplearon las ecuaciones propuestas por La Rue y Patterson (1981) (ecuación 1),

$$\% \text{Ndfa} = 100 \times \left(1 - \frac{\% \text{ } ^{15}\text{N en exceso leguminosa}}{\% \text{ } ^{15}\text{N en exceso trigo}} \right) = 100 \times \left(\frac{\left(\% \text{ } ^{15}\text{N}_{\text{trigo}} - \% \text{ } ^{15}\text{N}_{\text{aire}} \right) - \left(\% \text{ } ^{15}\text{N}_{\text{leguminosa}} - \% \text{ } ^{15}\text{N}_{\text{aire}} \right)}{\left(\% \text{ } ^{15}\text{N}_{\text{trigo}} - \% \text{ } ^{15}\text{N}_{\text{aire}} \right)} \right) \quad (1)$$

siendo $\% \text{ } ^{15}\text{N}_{\text{aire}} = 0.3663$.

La cantidad total de N_2 fijado fue calculada según la ecuación 2.

$$\text{N}_2 \text{ fijado (kg ha}^{-1}\text{)} = \left(\frac{\% \text{Ndfa}}{100} \right) \times \text{Rendimiento de N del cultivo leguminoso (kg ha}^{-1}\text{)} \quad (2)$$

3.4.2.2 Método de la abundancia natural

Para la estimación de la fijación de N_2 por este método, se tomó una muestra de plantas de leguminosas en maduración en las macropacelas correspondientes a la dosis residual de 100 kg N ha^{-1} . Las plantas de trigo utilizadas como referencia fueron tomadas de las macroparcelas correspondientes a las subparcelas de igual rotación con la leguminosa y a la dosis de 100 kg N ha^{-1} . En este método, ni las plantas de leguminosas ni el trigo de referencia recibió ningún aporte de ^{15}N . Todo el material vegetal muestreado fue secado a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ durante al menos 48 horas, triturado y homogeneizado. La abundancia isotópica de ^{15}N y el contenido total de N fueron determinados empleando técnicas de espectrometría de masas I.R.M.S. (Delta Plus XL) y combustión seca de Dumas (Eurovector mod. Euro 3011) respectivamente.

Material y Métodos

Para la determinación del porcentaje del N de la planta proveniente del aire (%Ndfa) se emplearon las ecuaciones propuestas por Ledgard and Peoples (1988) (ecuación 3),

$$\%Ndfa = 100 \times \left(\frac{\delta^{15}N \text{ trigo} - \delta^{15}N \text{ leguminosa}}{\delta^{15}N \text{ trigo} - B} \right) \quad (3)$$

donde $\delta^{15}N$ trigo y $\delta^{15}N$ leguminosa es la abundancia isotópica natural expresada en ‰ de los cultivos de trigo y leguminosa respectivamente.

El valor B es una medida del fraccionamiento isotópico durante la fijación de N_2 y es determinada por el análisis del $\delta^{15}N$ del N total acumulado por una leguminosa nodulada que crece en un medio libre de N. Los valores empleados para habas y guisante $B = -0.3\text{‰}$ (Unkovich *et al.*, 1994) y para garbanzo $B = -1.34\text{‰}$ (Unkovich y Pate, 2000).

El balance de N de un cultivo leguminoso representa el N añadido al sistema a través de la fijación de N_2 y es calculado como la diferencia entre el N_2 fijado y N cosechado (López-Bellido *et al.*, 2006) según la ecuación 4:

$$N \text{ balance (kg ha}^{-1}\text{)} = N_2 \text{ fijado} - N_{\text{grano}} \quad (4)$$

Finalmente, el N derivado del suelo (Ndfs) representa el N del suelo aportado al cultivo calculado según la ecuación 5 (López-Bellido *et al.*, 2006):

$$Ndfs \text{ (kg ha}^{-1}\text{)} = N \text{ total planta} - N_2 \text{ fijado} \quad (5)$$

3.4.3 ESTUDIO DE LA RIZODEPOSICIÓN DE N DE LAS LEGUMINOSAS MEDIANTE ^{15}N

El estudio de la rizodeposición de N se realizó en los cultivos de habas y garbanzos. Para ello se utilizaron 3 parcelas de laboreo convencional y 3 parcelas de no laboreo para cada leguminosa (rotación trigo-leguminosa con la dosis de N fertilizante de 100 kg N ha⁻¹ aplicado al cereal). Tras la siembra del correspondiente cultivo se delimitó una superficie de 0.5 m² en cada parcela de habas y garbanzos, utilizando un marco de acero enterrado hasta 25 cm de profundidad. En dicha superficie el número de plantas fue adecuado hasta alcanzar la densidad de cultivo óptima. A mediados de la floración de cada cultivo, las plantas fueron marcadas con ¹⁵N. Se utilizó urea como transportador de ¹⁵N por ser una molécula no polar de alta concentración de N y que se hidroliza rápidamente a amonio por la enzima ureasa omnipresente en la planta. El amonio marcado es rápidamente transformado en aminoácidos que son translocados a través de la planta. Para el marcado de las habas se empleó la técnica desarrollada por Rochester *et al.* (1998), inyectando dentro del tallo hueco 1ml de solución 0.45 M de urea enriquecida con ¹⁵N (0.981 mg de exceso de ¹⁵N/g N)/L. El garbanzo fue marcado mediante la técnica de alimentación foliar (leaf-feeding) desarrollada por Rochester *et al.* (1998), mediante la inserción de las hojas en viales que contenían 1ml de solución 0.15 M de urea enriquecida con ¹⁵N (0.981 mg de exceso de ¹⁵N/g N)/L. En los garbanzos el proceso de marcado se repitió tres veces a lo largo de un periodo de tres semanas. Los viales fueron retirados transcurridas 48 horas, cuando la solución de urea hubo desaparecido. Las plantas del interior de los marcos de acero fueron cosechadas en maduración. La parte aérea fue separada de las raíces, las cuales fueron extraídas del interior del marco en la mayor proporción posible. Todo el material vegetal muestreado fue secado a 70 °C durante al menos 48 horas, triturado y homogeneizado. El suelo del interior del marco de acero fue muestreado diferenciando tres perfiles de suelo: 0-30 cm, 30-60 cm y 60-90 cm. La abundancia isotópica de ¹⁵N y el contenido total de N fueron determinados empleando técnicas de espectrometría de masas I.R.M.S. (Delta Plus XL) y combustión seca de Dumas (Eurovector mod. Euro 3011) respectivamente.

Para la determinación de la proporción del N total en el suelo en cosecha proveniente de la rizodeposición (PNdfr), el exceso en ¹⁵N en el suelo en cosecha tras el cultivo de las plantas marcadas con ¹⁵N se dividió entre el exceso en ¹⁵N de las

raíces recuperadas (ecuación 6). Los valores de exceso de ^{15}N fueron obtenidos según las correcciones propuestas por Schmidtke (2005), empleando tanto para A como B en la ecuación 6 la abundancia en ^{15}N en el suelo en el que se cultiva la misma leguminosa (habas o garbanzos) no marcada con ^{15}N , tomando la muestra en la misma parcela pero fuera del marco de acero. Para el cálculo de la cantidad total de N derivado de la rizodeposición (Ndfr) se multiplicó PNdfr por la cantidad total de N en el suelo en cosecha en dichas parcelas (Schmidtke, 2005) (ecuación 7).

$$PN_{\text{dfr}} = \frac{\% \text{ } ^{15}\text{N en exceso suelo}}{\% \text{ } ^{15}\text{N en exceso raíces}} = \frac{\% \text{ } ^{15}\text{N suelo} - \% \text{ } ^{15}\text{N depósito A}}{\% \text{ } ^{15}\text{N raíces} - \% \text{ } ^{15}\text{N depósito B}} \quad (6)$$

$$Nd_{\text{fr}} = PN_{\text{dfr}} \times N \text{ total suelo} \quad (7)$$

3.4.4 ESTUDIO DEL SISTEMA RADICULAR

El estudio del sistema radicular del trigo, habas, garbanzos y girasol se llevó a cabo empleando un sistema de observación continuo no destructivo y mediante un sistema puntual de toma de muestras, separación y lavado manual de raíces.

3.4.4.1 Escáner radicular (Minirhizotron)

Para la observación continua se empleó un escáner radicular y tubos de acceso permanentemente instalados en el suelo, conocidos como “minirhizotron system”. Los tubos de acceso consisten en un tubo cilíndrico de plexiglás transparente a través del cual se introduce el escáner radicular. Para la instalación de los tubos se empleó una barrena del mismo diámetro exterior, practicando una perforación en el suelo a 45° (Brown y Upchurch, 1987; Johnson *et al.*, 2001) en la línea de cultivo cuando las plántulas se encontraban en cotiledones. Una vez estabilizados los tubos y obtenido el contacto idóneo entre tubo y suelo comenzó la toma de imágenes con el escáner. El sistema se basa en un escáner circular conectado a un ordenador que posee el software necesario para su funcionamiento. El escáner se introduce en el cilindro de

plexiglás y realiza la toma de imágenes del interior del tubo en diferentes fragmentos, hasta un total de 6 por tubo. Mediante el empleo de una varilla graduada se garantiza la misma coloración del escáner en cada tubo. La frecuencia de muestreo se estableció en 2 semanas de acuerdo con Joslin y Wolfe, 1998; Kubiske *et al.*, 1998 y Thomas *et al.*, 1999. Las imágenes obtenidas fueron procesadas empleando el software específico WinRhizotron® (Regent Instruments, 2005), obteniendo los valores de longitud radicular (cm cm^{-2}), superficie radicular proyectada ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$), superficie radicular total ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$), diámetro radicular (mm) y volumen radicular ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-2}$) para cada cultivo. La profundidad de suelo medida en proyección vertical se obtuvo empleando el ángulo de inclinación medio de los tubos observado en campo (45°), dando lugar a los perfiles de observación 0-16, 16-33, 33-49, 49-65, 65-81, 81-98 cm de profundidad. Los datos de la totalidad del perfil también fueron analizados expresados como el perfil 0-98 cm.

3.4.4.2 Separación y lavado manual de raíces

Para la determinación de raíces mediante un método tradicional se tomaron cilindros de suelo empleando una sonda específica Eickelcamp de 8 cm. Ø. Las muestras fueron tomadas en la línea de cultivo, en 7 perfiles diferentes (0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-55, 55-70, 70-85 cm) hasta una profundidad total de 85 cm. Los diferentes perfiles, agrupados según profundidades, se hicieron coincidir con la proyección vertical de los fragmentos de suelo observados con el escáner radicular con el objetivo de calibrar y poner a punto la nueva metodología.

Los cilindros de suelo de cada cultivo se tomaron cuando éstos se encontraron en floración, por ser el momento de máximo desarrollo radicular. Las muestras obtenidas fueron rápidamente congeladas a -30°C para evitar la descomposición de las raíces hasta el momento de su procesado en laboratorio.

Para el lavado y posterior separación de las raíces en cada muestra de suelo se empleó la técnica de disolución de arcillas empleando una solución de bicarbonato sódico al 3% (Manschadi *et al.*, 1998). Las muestras se mantuvieron 12 horas en esta

Material y Métodos

solución antes de ser lavadas, empleando una criba de 0,5 y 1 mm de luz y agua destilada para ello. Las raíces lavadas fueron digitalizadas para poder determinar su longitud y área. Para ello se empleó un software específico de tratamiento de imágenes CIAS (CID, 2002).

Tras ser digitalizadas, las raíces fueron secadas a 40 °C durante 24 horas, pesadas y analizado su contenido en N y C totales empleando la técnica de combustión seca de Dumas (Eurovector).

3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados fueron sometidos a un análisis de la varianza (ANOVA) mediante el paquete estadístico STATISTIX 7.0 (Analytical Software, Tallahassee, 2001), para determinar el efecto del año y sistema de laboreo sobre 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

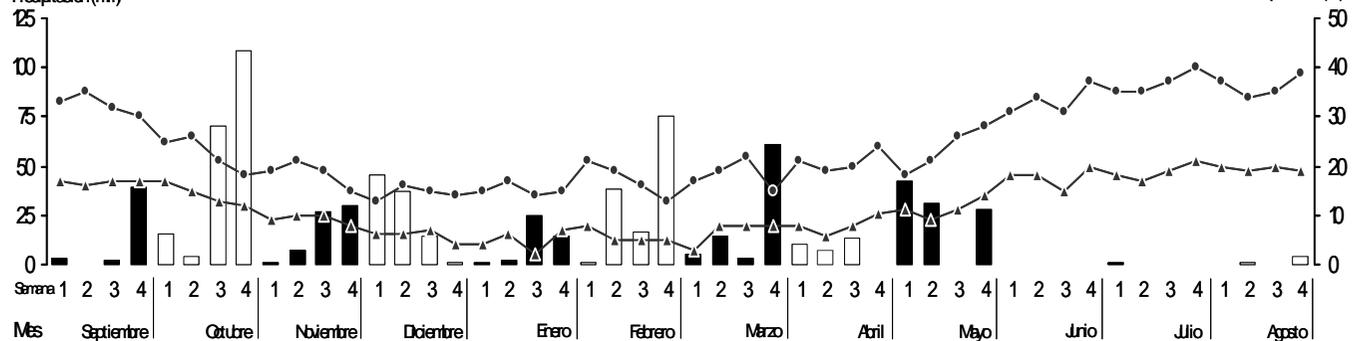
4.1 CLIMA

La precipitación registrada durante los 2 años de estudio varió considerablemente (Figura 4.1), con una diferencia total de 461.4 mm entre las campañas. La lluvia total registrada en el primer año alcanzó los 796.8 mm, mientras que en 2004-05 sólo se registraron 335.4 mm. Atendiendo a la precipitación media de 30 años en la zona (584 mm), el primer año de estudio podría caracterizarse como lluvioso y el segundo como seco. A pesar de las diferencias en la precipitación entre ambos años, la distribución de la lluvia por estaciones durante el periodo de crecimiento siguió el mismo patrón en ambas campañas. Las lluvias otoñales supusieron el 39 % de la precipitación total en ambos años. En la campaña 2003-04 estas lluvias se registraron de manera uniforme a lo largo de la estación otoñal (Figura 1), favoreciendo la nascencia e implantación del cultivo de trigo y habas. Las lluvias otoñales registradas en la campaña 2004-05 estuvieron concentradas en la segunda mitad de octubre y principios de diciembre (Figura 4.1). Este hecho resultó bastante negativo para el nacimiento de los cultivos de invierno, alternándose estados de humedad y déficit hídrico en el suelo que provocaron un establecimiento anormal del trigo y habas. Tradicionalmente se ha asumido que la precipitación que se produce durante el periodo reproductivo del trigo en la región Mediterránea tiene un efecto decisivo sobre el rendimiento del trigo. Un estudio de siete años realizado por López-Bellido *et al.* (1996) en el mismo experimento, puso de manifiesto que los mayores rendimientos del trigo se obtenían cuando las lluvias del periodo vegetativo fueron superiores a las del periodo reproductivo. Según Probert *et al.* (1987), la textura arcillosa de los Vertisoles (con predominio de montmorillonita), permite absorber grandes cantidades de agua y retenerla durante largos periodos de tiempo. Las lluvias de invierno y primavera supusieron el 33 % y 27.6 % respectivamente para ambos años. La precipitación registrada entre ambas estaciones fue de 484 mm y 200 mm para el 2003-04 y 2004-05 respectivamente. Estas diferencias de lluvia ejercieron una marcada influencia en el rendimiento final de los cultivos entre los dos años.

2003-2004

Precipitación total: 796.8 mm

Precipitación (mm)



2004-2005

Precipitación total: 336.4 mm

Precipitación (mm)

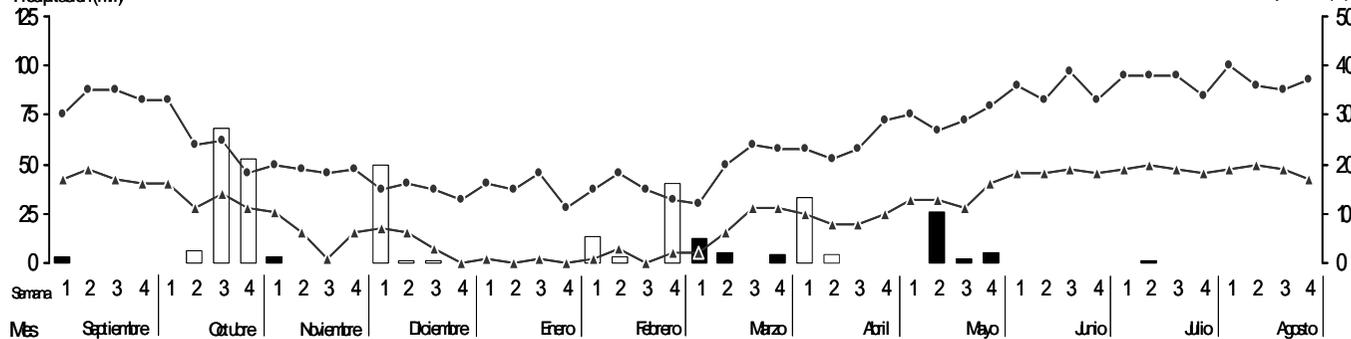


Figura 4.1. Precipitación (semanal y total) y temperatura (media de máximas y mínimas semanales) durante los años 2003-04 y 2004-05 en Córdoba.

Las temperaturas tuvieron una evolución similar en ambos años, aunque fueron ligeramente más altas en 2004-05 tanto en invierno como en primavera (Figura 4.1). Las temperaturas medias de invierno se situaron en torno a los 13°C en los dos años, y las mínimas entre 6.3°C en 2004-05 y 8.1°C en 2003-04. Durante el periodo de llenado del grano (abril-mayo) las temperaturas medias oscilaron entre 17.5°C en 2003-04 y 18.7°C en 2004-05, y las máximas entre 24.3 y 26.4°C, en 2003-04 y 2004-05, respectivamente.

4.2 TRIGO

4.2.1 RENDIMIENTO

La respuesta del rendimiento del trigo estuvo influenciada por las condiciones climáticas en la estación de crecimiento, variando significativamente entre años (Tabla 4.1). En el conjunto de los años estudiados el rendimiento medio fue significativamente superior en 2003-2004 (Tabla 4.1). Las escasas precipitaciones y distribución de las mismas en el segundo año dificultaron el establecimiento y ahijado del trigo (Figura 4.1), manifestándose en el rendimiento de grano final. López-Bellido y López-Bellido (2001) señalaron que la respuesta de rendimiento del trigo disminuye cuando la lluvia durante el periodo vegetativo (noviembre-febrero) es superior a 450 mm, situación que no se dio en ninguno de los dos años de estudio, donde en el mismo periodo se alcanzaron 333.4 mm y 112.2 mm en el primer y segundo año de estudio respectivamente.

Tabla 4.1. Efecto del sistema de laboreo en el rendimiento del trigo. Años 2003-04 y 2004-05.

Sistema de laboreo	Año		Media
	2003-04	2004-05	
	Kg ha ⁻¹		
No laboreo	5137a*	1440a	3288a
Laboreo	4485a	401b	2443b
Media	4811 A	921 B	2866

* Letras diferentes en cada columna representan la existencia de diferencia significativa a $P < 0.05$ de acuerdo con la MDS.

El sistema de laboreo influyó significativamente en el rendimiento medio del trigo en los años de estudio (Tabla 4.1). Aunque en el año 2003-04 los rendimientos de grano más elevados se obtuvieron en el no laboreo, las diferencias no fueron significativas. Según Bonari *et al.* (1994) en condiciones de altas precipitaciones el laboreo convencional se muestra más efectivo en el incremento del rendimiento del trigo. En este estudio la tendencia se invierte, aunque sin diferencias significativas. Sin embargo, los rendimientos obtenidos en 2004-05 presentaron diferencias significativas entre los dos sistemas de laboreo (Tabla 4.1). De acuerdo con López Bellido *et al.* (1996), cuando ocurren condiciones de escasa precipitación y humedad en el suelo, el no laboreo presenta una mejor respuesta en el rendimiento, obteniendo en este caso hasta 1039 kg ha⁻¹ de trigo más que en laboreo convencional. Según López Bellido *et al.* (2005), el no laboreo presenta una tendencia a suministrar más agua en los años más secos, pero a nivel de agua suministrada y rendimiento se puede afirmar que ambos sistemas son iguales, ya que la variabilidad de las condiciones climáticas interanuales tiende a compensar los posibles beneficios o perjuicios de cada sistema para cada año concreto.

4.2.2 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA RADICULAR

4.2.2.1 EXTRACCIÓN MANUAL

La densidad radicular del trigo estuvo influenciada de forma significativa por las condiciones climáticas (Tabla V), mostrando notables diferencias entre años (Figura 4.2). El sistema de laboreo no influyó de forma significativa sobre la densidad radicular media en el año de mayor precipitación. Sólo se apreciaron diferencias significativas en la densidad en el perfil 0-10 cm. La estrecha similitud de valores registrados en el resto de perfiles para ambos sistemas de laboreo excepto para ese perfil sugiere que dicha variación podría atender más bien a la elevada variabilidad del sistema radicular que a un efecto directo del tratamiento. Debido a que los valores reflejan el sistema radicular en un momento puntual (floración del cultivo), dicha densidad radicular podría considerarse como la máxima alcanzada por el cultivo en su estación de crecimiento vegetativo.

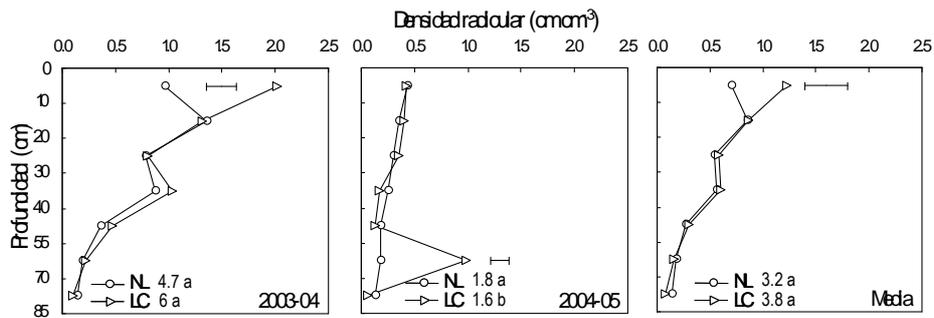


Figura 4.2. Efecto del sistema de laboreo en la densidad radicular del trigo en los años 2003-04 y 2004-05. En el interior de la figura se muestran los valores correspondientes a la totalidad del perfil (0-85 cm). NL: no laboreo; LC: laboreo convencional. Barras horizontales representan diferencias significativas ($P < 0.05$) por perfiles y letras diferentes representan diferencias significativas ($P < 0.05$) en el perfil completo (0-85cm).

En el no laboreo, la densidad radicular máxima se alcanza en el perfil comprendido entre 10 y 20 cm de profundidad, presentando un patrón de crecimiento típico (Merrill *et al.*, 1996), con un aumento de la densidad en el perfil 30-40 cm y descenso progresivo de la misma con la profundidad. El patrón de crecimiento radicular en el laboreo convencional no difirió del registrado en el no laboreo a excepción del perfil 0-10 cm.

La escasa pluviometría del segundo año de estudio (2004-05) produjo un descenso acusado de la densidad radicular en el trigo, presentando sólo una variación de 0.30 cm cm^{-3} entre el perfil más superficial y el más profundo. Sin embargo, se encuentra bien referenciado el hecho de que la raíz crece en respuesta a la falta de agua y nutrientes en la rizosfera (Merrill *et al.*, 2002). Un ejemplo de balance dinámico entre el crecimiento radicular y de la parte aérea fue dado por Hoogenboom *et al.* (1987), quienes observaron un crecimiento significativamente superior en cultivos de trigo y soja en secano que cuando a éstos se les aplicaba riego. Las raíces crecieron hacia los horizontes más profundos sin que se produjera un aumento significativo en ninguno de ellos, a excepción del registrado en el perfil 55-70 cm en laboreo convencional, pudiendo deberse más a una variación espacial acusada que al efecto del sistema de laboreo. La densidad media presentó variaciones a consecuencia del sistema de laboreo, con diferencias significativas únicamente en el perfil 0-10 cm (Figura 4.2).

El área radicular del trigo también estuvo afectada de forma significativa por las condiciones climáticas (Tabla VI), aunque los valores no experimentasen notables variaciones entre si. El sistema de laboreo no tuvo influencia sobre el área radicular (Figura 4.3), aunque éstos fueron ligeramente superiores en el año más húmedo. El fuerte incremento de área radicular registrado en el perfil 0-10 cm del laboreo convencional en el año más húmedo se corresponde a la elevada densidad radicular registrada en dicho perfil. No existió correspondencia entre la superficie y la densidad radicular observada en el perfil 55-70 cm del no laboreo en el año 2004-05.

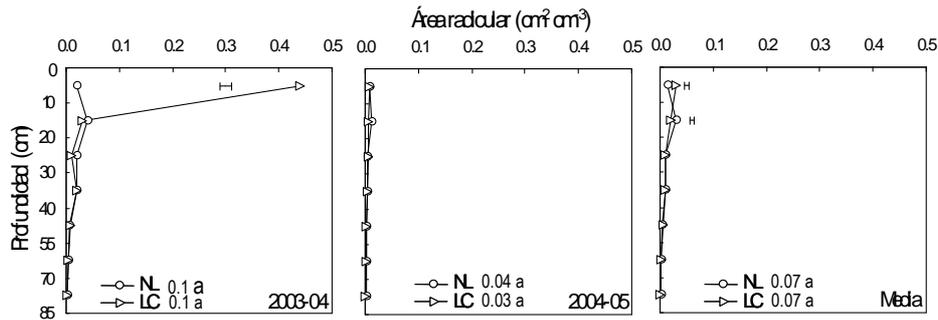


Figura 4.3. Efecto del sistema de laboreo en la área radicular del trigo en los años 2003-04 y 2004-05. En el interior de la figura se muestran los valores correspondientes a la totalidad del perfil (0-85 cm). NL: no laboreo; LC: laboreo convencional. Barras horizontales representan diferencias significativas (P<0.05) por perfiles y letras diferentes representan diferencias significativas (P<0.05) en el perfil completo (0-85cm).

La biomasa radicular del trigo también fue influenciada de forma significativa por las condiciones climáticas (Tabla VII), con valores que oscilaron entre los 621 y 1501 kg de raíces por hectárea en no laboreo para la totalidad del perfil (0-85 cm) en el año más seco y húmedo respectivamente (Figura 4.4). En el laboreo convencional los valores oscilaron entre 414 kg de raíces ha⁻¹ del año más seco y 1665 kg de raíces ha⁻¹ del año más húmedo (Figura 4.4).

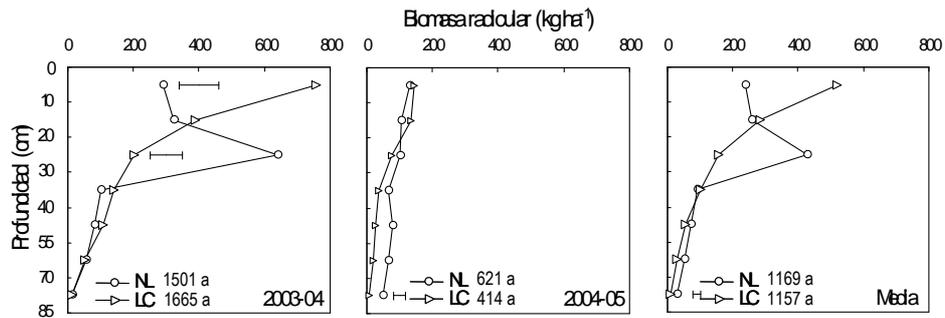


Figura 4.4 Efecto del sistema de laboreo en la biomasa radicular del trigo en los años 2003-04 y 2004-05. En el interior de la figura se muestran los valores correspondientes a la totalidad del perfil (0-85 cm). NL: no laboreo; LC: laboreo convencional. Barras horizontales representan diferencias significativas ($P < 0.05$) por perfiles y letras diferentes representan diferencias significativas ($P < 0.05$) en el perfil completo (0-85cm).

En el año 2003-04 se observan diferencias significativas entre los sistemas de laboreo que ponen de manifiesto dos patrones diferentes de acumulación de materia orgánica radicular, aunque en el cómputo del perfil completo (0-85 cm) no existan diferencias significativas entre sistemas de laboreo. Mientras que en el no laboreo mayor acumulación de biomasa se produce en el perfil comprendido entre los 20 y 30 cm de profundidad y luego desciende con la profundidad, en el laboreo convencional se produce una acumulación gradual que desciende con la profundidad, alcanzando los valores más elevados en los perfiles más superficiales.

En el año 2004-05 se observa la misma tendencia de crecimiento que en el año anterior, aunque las diferencias son apenas notables debido a la considerable reducción de la biomasa radicular registrada como consecuencia de la falta de agua. En este año se registra una diferencia de 207 kg de raíces ha^{-1} a favor del no laboreo, sin que existan diferencias significativas, pudiendo estar relacionado con el aumento de rendimiento de grano registrado en dicho año. En la figura 4.4 se observa que la biomasa radicular media registrada en los dos años de estudio se distribuye de forma distinta en los diferentes perfiles, aunque no existan diferencias significativas.

La concentración de N presente en las raíces de cada perfil fue determinado y expresado como N potencialmente suministrable al suelo por las raíces tras su descomposición, expresándolo en kg N ha^{-1} ya que está en función de la biomasa de

Resultados y Discusión

raíces en cada perfil. El N radicular del trigo estuvo influenciado por la precipitación (Tabla VIII), registrando valores de N aportado superiores en el año más húmedo (Figura 4.5), consecuencia de la mayor cantidad de biomasa radicular en ese año. El sistema de laboreo influyó significativamente en la cantidad de N aportado por las raíces en los perfiles 0-10 cm y 20-30 cm en el año 2003-04. No se encontraron diferencias en la concentración de N en las raíces (expresada en tanto por ciento), que varió únicamente en los diferentes perfiles en el año más lluvioso (Tabla XXI). La cantidad de N aportado por las raíces en el perfil completo (0-85 cm) tampoco estuvo influenciada por el sistema de laboreo, aunque se aprecia una tendencia a aumentar en el laboreo convencional en el año más húmedo y viceversa en el año más seco (Figura 4.4)

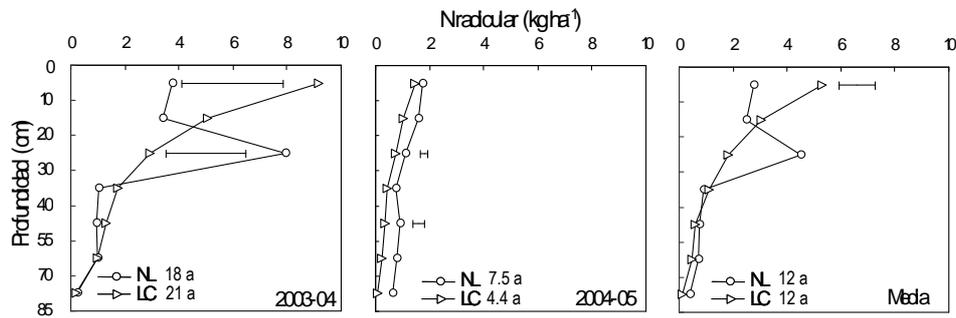


Figura 4.5 Efecto del sistema de laboreo en el N radicular del trigo en los años 2003-04 y 2004-05. En el interior de la figura se muestran los valores correspondientes a la totalidad del perfil (0-85 cm). NL: no laboreo; LC: laboreo convencional. Barras horizontales representan diferencias significativas ($P<0.05$) por perfiles y letras diferentes representan diferencias significativas ($P<0.05$) en el perfil completo (0-85cm).

En los años estudiados el trigo se encontró bajo la influencia tanto de la precipitación, escasa en la campaña 2004-05, como por la limitación en la humedad del suelo derivada de la rotación bianual con girasol, cultivo que presenta una enorme capacidad para la extracción de agua, especialmente de los perfiles más profundos (Black y Tanaka, 1996; López-Bellido *et al.*, 2002). Bajo estas condiciones, el no laboreo aumentó el rendimiento de grano en ambos años, aunque con diferencias significativas sólo para el año más seco. De acuerdo con Merrill *et al.* (1996), el no laboreo produjo una disminución del crecimiento radicular (caracterizado por los parámetros expresados en las figuras 4.2, 4.3 y 4.4) en el año más húmedo, incrementando significativamente el crecimiento de la raíz en el más

seco. Según Merrill *et al.* (1996) los factores o condiciones que mejoran la eficiencia del sistema radicular en el no laboreo se basan en una más eficaz conservación y uso del agua del suelo. Además se desarrolla un sistema radicular más eficiente (especialmente en los primeros centímetros de suelo), donde una menor densidad de raíces es necesaria para realizar la misma función de absorción. La protección frente a los cambios de temperatura originado por los residuos de cosecha (Horton *et al.*, 1996), evitan que la planta sufra estrés térmico a nivel radicular, especialmente en las etapas más tempranas del cultivo. La distribución de la densidad y biomasa radicular está en concordancia con la obtenida por Jiménez *et al.* (2002), concentrándose en los primeros 30 cm de suelo el 70 % de la densidad total en el perfil, y entre el 50 % y 60 % de la materia seca radicular (siempre en el momento de máximo desarrollo radicular). La obtención de una mayor cantidad de raíces en no laboreo en los perfiles más profundos podría deberse a la tendencia que posee el sistema radicular a penetrar en el suelo siguiendo los canales dejados por las raíces de los cultivos precedentes (Merrill *et al.*, 1996). Estas diferencias no fueron tan patentes en los perfiles superficiales dado que en los suelos Vertisoles se produce una rotura de éstos tras la estación seca, debido a movimientos de dilatación y contracción que eliminan todo canal existente con anterioridad. El N orgánico contenido en las raíces finas se encuentra sujeto a rápidos procesos de inmovilización microbiana y mineralización (Jiménez *et al.*, 2002). La determinación de N realizada subestima la cantidad total de N procedente del sistema radicular. Además esta estimación no incluye la contribución de los exudados radiculares y mucílagos procedentes de la raíz, que según Jiménez *et al.* (2002) puede suponer hasta el 54 % del N total extraído por la planta (282 kg N ha⁻¹).

4.2.2.2 MINIRHIZOTRON

Los parámetros de estudio radicular fueron obtenidos del análisis de las raíces vivas únicamente, aunque es conocido que la clasificación de raíces vivas y muertas atendiendo sólo al cambio de color de blanco a marrón a menudo subestima la vida media de la raíz, ya que no se tiene la certeza de que las raíces que toman coloraciones marrones estén siempre muertas (Eissenstat y Yanai, 1997). La alta

variabilidad que a menudo presentan los datos que se derivan de la observación de raíces dificultó la obtención de diferencias estadísticas en la mayoría de los parámetros estudiados. La longitud radicular es uno de los parámetros más importantes y ampliamente utilizados para describir las raíces finas y predecir sus respuestas a cambios en el ambiente. La longitud radicular del trigo por unidad de superficie en el año 2003-04 se muestra en la figura 4.6. El sistema de laboreo sólo influyó significativamente en el desarrollo de las raíces más próximas a la superficie, situadas entre los 0 y 33 cm de profundidad. Similares resultados fueron obtenidos por Merrill *et al.* (1996). En el perfil de suelo 0-16 cm la longitud de las raíces fue significativamente superior en el laboreo convencional cuando el trigo se encontraba en el estado fenológico de aparición de la hoja bandera. La tendencia de crecimiento en ese perfil es similar entre ambos sistemas de laboreo a lo largo de la estación de crecimiento. En el perfil 16-33 cm el trigo alcanzó una mayor longitud radicular en el no laboreo durante el espigado (Figura 4.6). Aunque se produjeron diferencias superiores entre sistemas de laboreo para otros estados fenológicos, los elevados coeficientes de variación obtenidos (no mostrados aquí) redujeron la significación. A diferencia de los resultados aportados por Merrill *et al.* (2002), la mayor longitud radicular se obtuvo en el perfil de suelo comprendido entre los 33 y 49 cm. El patrón de crecimiento radicular del resto de los perfiles manifestó tendencia a alcanzar mayores valores en el no laboreo, aunque en las primeras etapas del cultivo se registrasen iguales valores en ambos sistemas o ligeramente superiores en el laboreo convencional. Se observaron dos patrones de crecimiento diferentes en función de la profundidad. Entre los 0 y 65 cm las raíces crecieron hasta alcanzar un valor máximo en el encañado y otro en el espigado, mientras que entre 65 y 98 cm las raíces alcanzaron una longitud máxima en el espigado, manteniéndose constante hasta que el grano alcanzó el estado de lechoso. Comportamientos similares fueron descritos por Yamaguchi y Tanaka (1990) para trigo (*Triticum aestivum* L.), soja (*Glycine max* Merr) y arroz (*Oryza sativa* L.). En el perfil 16-33 cm el trigo alcanzó una mayor longitud radicular en el no laboreo durante el espigado (Figura 4.6).

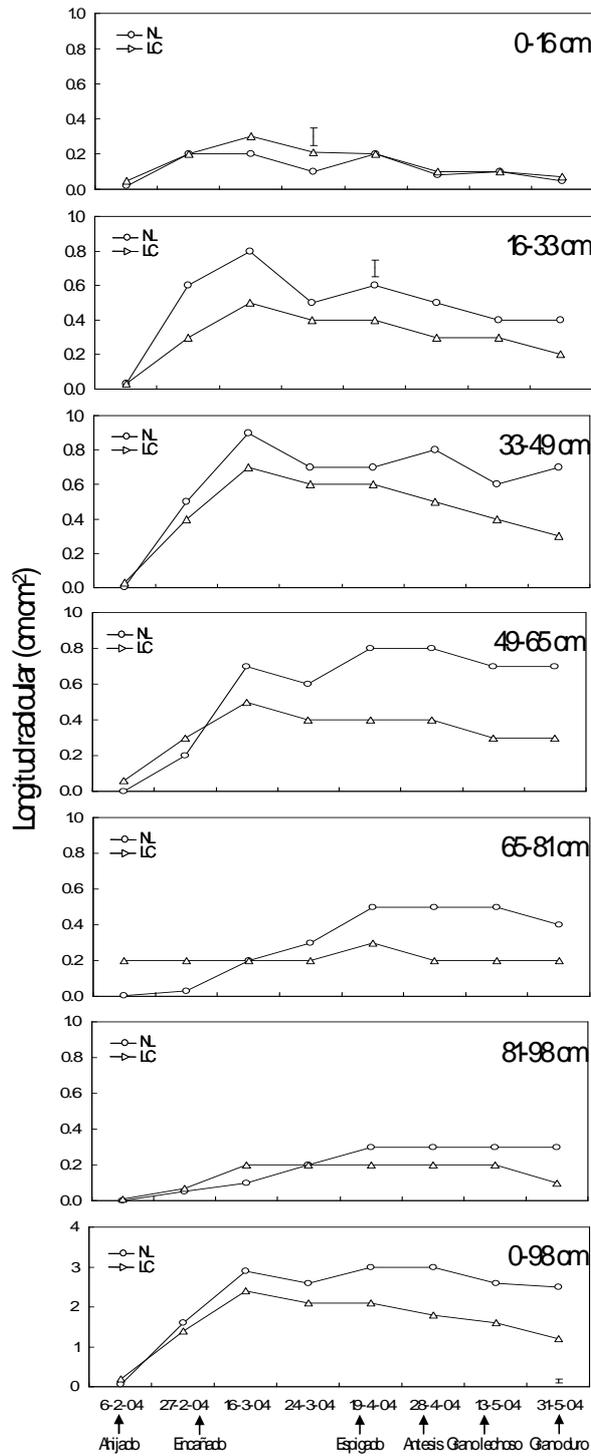


Figura 4.6 Efecto del sistema de laboreo en la longitud radicular del trigo en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo convencional)

A diferencia de los resultados aportados por Merrill *et al.* (2002), la mayor longitud radicular se obtuvo en el perfil de suelo comprendido entre los 33 y 49 cm. La disminución de la longitud que se observa entre el encañado y el espigado podría deberse a un aumento del crecimiento lateral de las raíces, predominando el desarrollo vertical durante las etapas iniciales y el espigado del cultivo. Además, las fuertes lluvias registradas durante la cuarta semana de marzo pudieron detener el crecimiento de la raíz como consecuencia del elevado nivel de agua en el suelo. Las diferencias significativas encontradas en el perfil 0-16 cm en esta fecha podrían deberse a las diferentes condiciones de humedad en el suelo entre sistemas de laboreo. Las raíces alcanzaron la mayor profundidad (98 cm) en el encañado (Figura 4.6). La longitud radicular total alcanzada en el perfil (0-98cm) se muestra en la figura 4.6. El sistema de laboreo sólo influyó significativamente en la longitud radicular cuando el trigo se encontró en el estado de grano duro. Los mayores valores se alcanzaron en no laboreo en el espigado y antesis (3 cm cm^{-2} en ambos casos). El patrón de distribución fue similar en ambos sistemas de laboreo exceptuando las últimas etapas del cultivo, donde las raíces en no laboreo tienden a mantener su actividad más tiempo. Según Merrill *et al.* (1996), el descenso en la temperatura de suelo que se obtiene en el no laboreo es muy beneficioso para el sistema radicular, aumentando su vida media y mejorando su eficiencia, lo que a menudo confiere a la planta una ventaja en el crecimiento y rendimiento en grano.

La superficie radicular proyectada y superficie radicular total son dos parámetros a veces empleados para describir la capacidad de absorción de la raíz, los cuales se encuentran estrechamente relacionados con el diámetro y el volumen radicular (Johnson *et al.*, 1995). La superficie radicular proyectada del trigo en el año 2003-04 se muestra en la figura 4.7. El sistema de laboreo no influyó significativamente en la superficie proyectada en ninguno de los perfiles estudiados por separado ni tampoco en la totalidad del perfil en conjunto (Figura 4.7, tabla XI). El aumento y distribución de la superficie proyectada fue similar a lo largo del periodo de cultivo para todos los perfiles, poniendo de manifiesto que la combinación de crecimiento en longitud y engrosamiento de la raíz es un parámetro estable a lo largo del mismo.

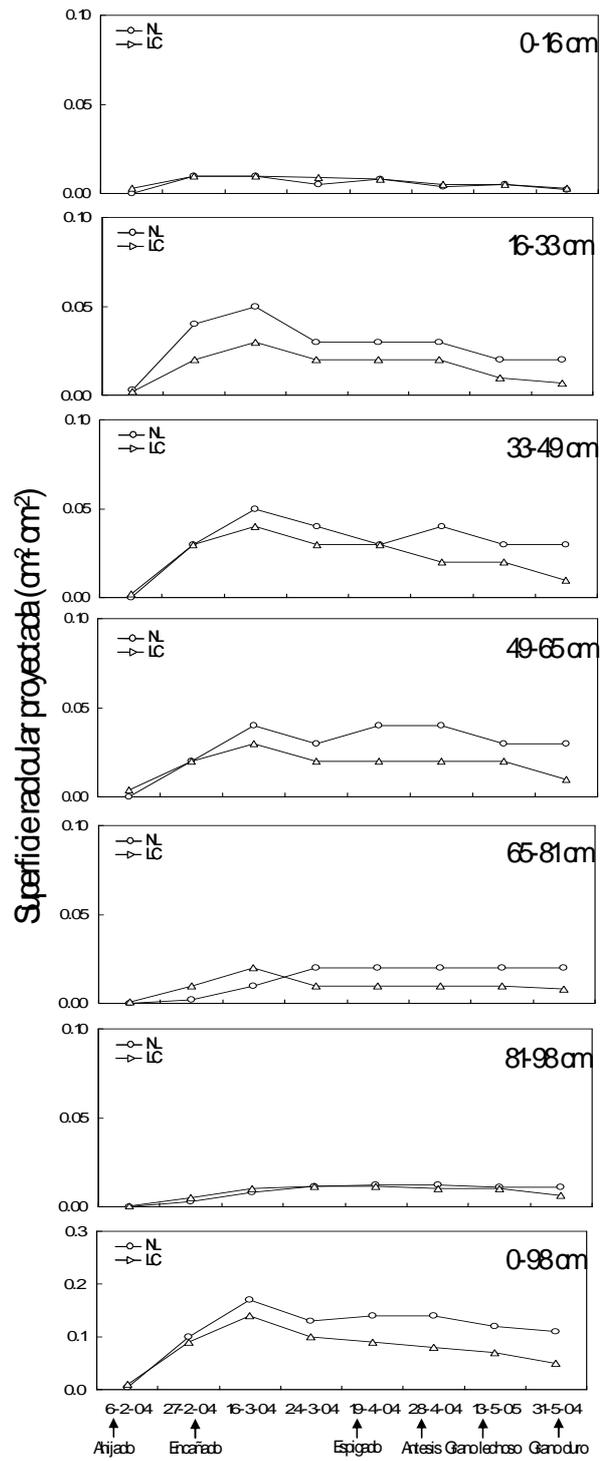


Figura 4.7 Efecto del sistema de laboreo en la superficie radicular proyectada del trigo en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo convencional)

La superficie radicular total tampoco se vio afectada por el sistema de laboreo en ninguno de los perfiles estudiados y tampoco en ninguno de los estados fenológicos del cultivo representados (Figura 4.8, tabla XII). La información aportada por este parámetro no permite una caracterización satisfactoria del sistema radicular, ya que es una combinación de longitud y diámetro de la raíz. Así como una combinación de raíces cortas y gruesas proporcionarían una superficie radicular similar a una combinación de raíces largas y finas, la función fisiológica de ambas es muy diferentes. Una elevada longitud radicular específica ($m\ g^{-1}$) es considerada como la mas eficiente en términos de absorción de agua y nutrientes por unidad de carbono empleado (Fitter, 1991, 1996; Yanai *et al.*, 1995).

El diámetro radicular tampoco estuvo influenciado de forma significativa por el sistema de laboreo en ninguno de los perfiles ni estados fenológicos estudiados (Figura 4.9, tabla XIII). La tendencia a un mayor engrosamiento de las raíces en el no laboreo en las etapas iniciales del cultivo desaparece prácticamente a partir del encañado, manteniéndose un patrón y diámetro radicular similar y constante hasta el final del cultivo. El diámetro radicular medio a lo largo del perfil fue similar para los dos sistemas de laboreo, y constante a lo largo de la estación de crecimiento del cultivo. El 100 % de las raíces tuvieron un diámetro medio comprendido entre los 0.04 y 0.06 mm.

El volumen radicular observado, expresado en cm^3 de raíz por cm^2 , estuvo influenciado significativamente por el sistema de laboreo (Figura 4.10, tabla XIV). El no laboreo presentó mayor volumen radicular en el perfil 16-33 cm. En el perfil 33-49 cm el no laboreo fue significativamente superior en antesis y grano duro. La evolución del volumen radicular mantuvo una tendencia similar en la totalidad del perfil a lo largo del cultivo (Figura 4.9), con valores ligeramente superiores en el no laboreo pero sin que se registrasen diferencias significativas entre los mismos.

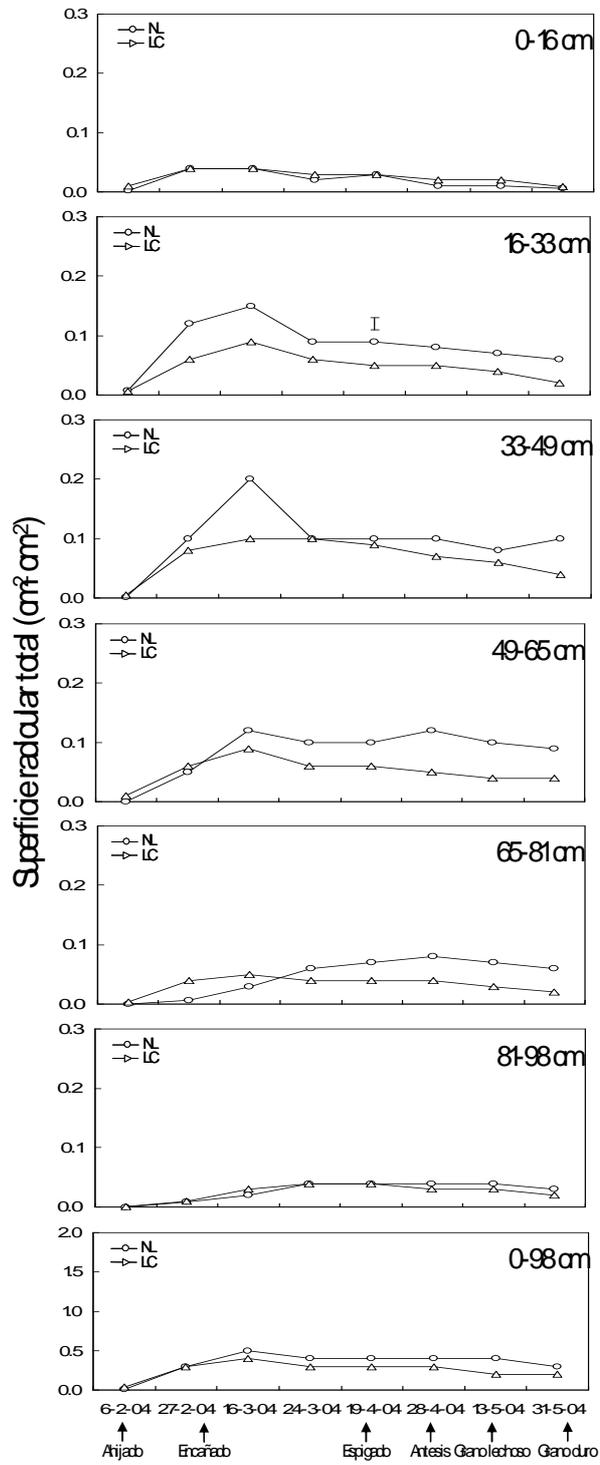


Figura 4.8 Efecto del sistema de laboreo en la superficie radicular total del trigo en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo convencional)

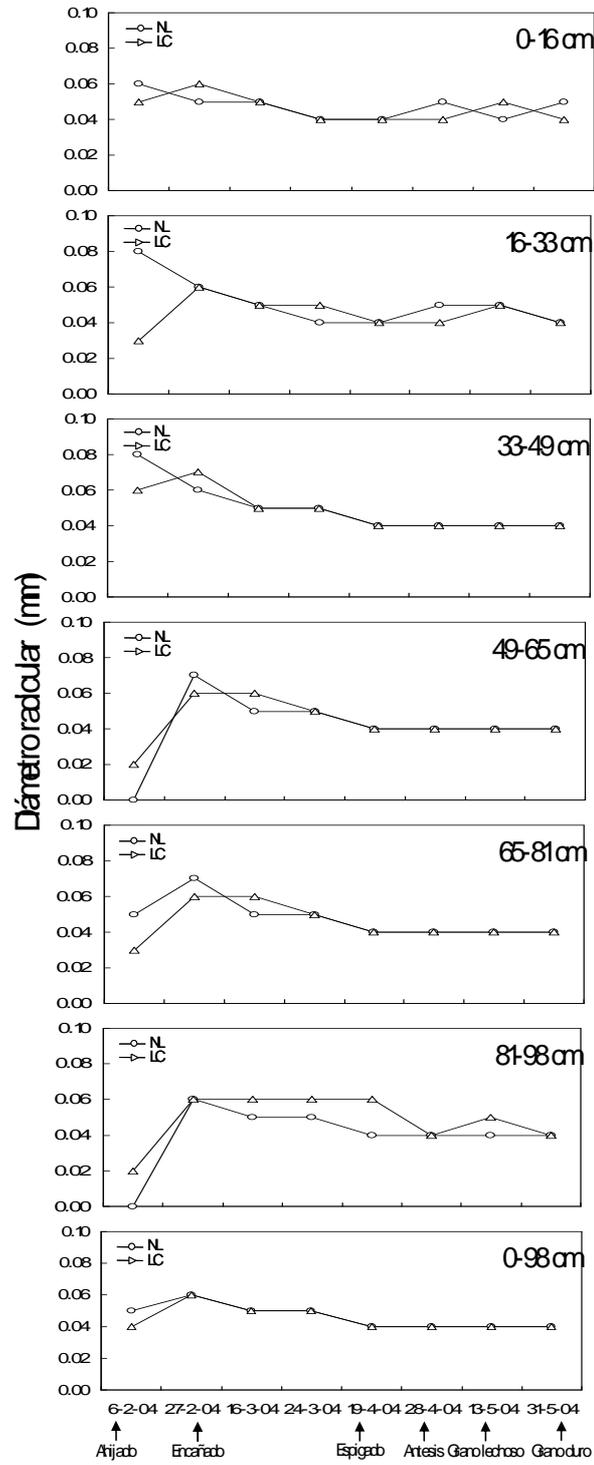


Figura 4.9 Efecto del sistema de laboreo en el diámetro radicular del trigo en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo convencional)

Las observaciones realizadas mediante minirhizotron han demostrado ser de gran utilidad para la caracterización del sistema radicular al menos de una forma cualitativa (Smit *et al.*, 2000). Sin embargo, existen dificultades para convertir los parámetros obtenidos de la observación en valores más utilizables como la densidad volumétrica radicular (cm cm^3) o biomasa radicular. La estimación de la producción de raíces finas difiere sustancialmente en magnitud, pudiendo existir diferencias de 0 a $4600 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ si las muestras son analizadas mediante lavado manual o mediante la observación con minirhizotrón respectivamente (Hendricks *et al.*, 2006). Al igual que numerosos autores, se realizó una calibración de los datos del minirhizotron mediante el empleo de la fórmula para convertir los datos de longitud radicular en densidad radicular propuesta por Merrill y Upchurch (1994). Para ello se realizó una correlación entre los datos obtenidos mediante el lavado manual y los obtenidos de la conversión de Merrill y Upchurch (1994). Los elevados coeficientes de variación típicos de todas las medidas radicales, en particular los causados por la general variabilidad de la arquitectura del sistema radicular y su expresión local (en respuesta a impedimentos físicos, gradiente de concentración de nutrientes...) originan que la calibración sea difícil, siendo la validación de resultados un ejercicio extremadamente limitado (Heeraman y Juma, 1993). No se encontró ninguna correlación significativa entre la densidad radicular obtenida mediante el lavado manual y mediante el minirhizotron ($r = 0.068$; $n = 24$) ni entre el área radicular obtenida por los diferentes métodos ($r = 0.03$; $n = 24$). Sin embargo, una correlación positiva significativa fue encontrada entre los dos parámetros obtenidos por los diferentes métodos cuando se combinaron todos los cultivos, perfiles y sistemas de laboreo estudiados. Los coeficientes de correlación obtenidos fueron bajos, tanto para la densidad ($r = 0.38^*$; $n = 96$) como para el área radicular ($r = 0.33^*$; $n = 96$).

Resultados y Discusión

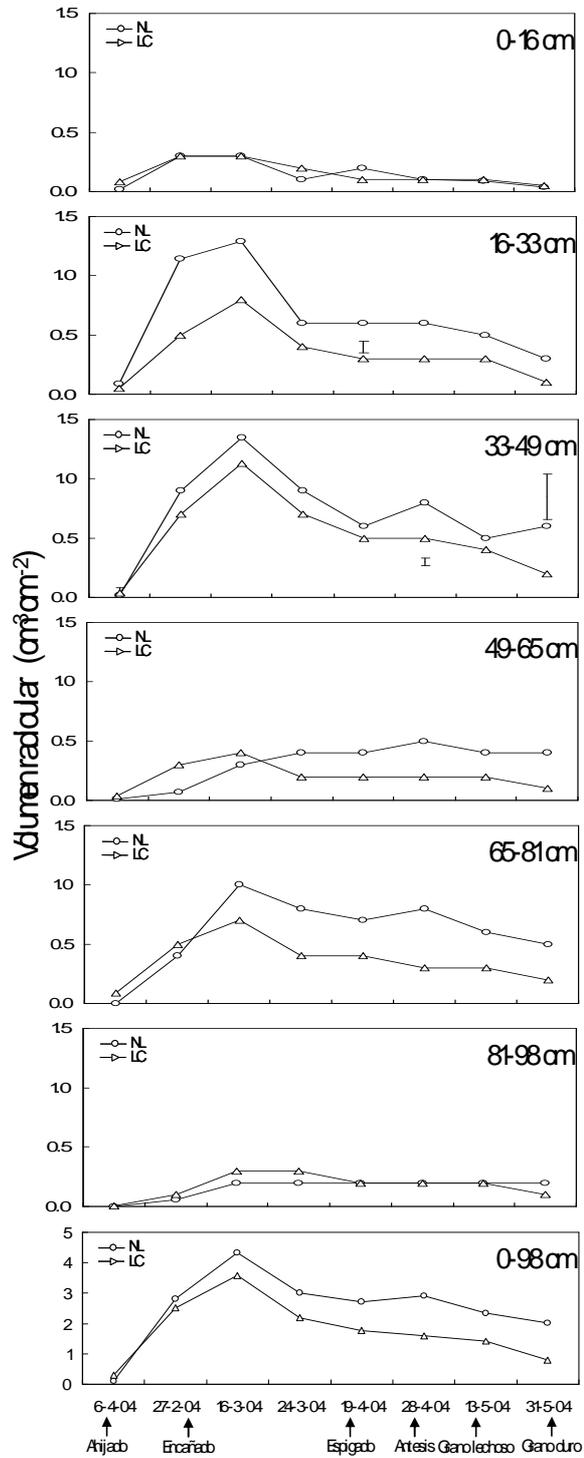


Figura 4.10 Efecto del sistema de laboreo en el volumen radicular del trigo en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo convencional)

4.3 GIRASOL

4.3.1 RENDIMIENTO

El rendimiento del girasol estuvo influenciado por las condiciones climáticas en la estación de crecimiento, variando significativamente entre años (Tabla 4.2). En el conjunto de los años estudiados el rendimiento medio fue significativamente superior en 2003-2004 que en 2004-2005 (Tabla 4.2). El sistema de laboreo no influyó significativamente en el rendimiento de grano en el año más lluvioso, mientras que en el año más seco sólo se obtuvo cosecha en el no laboreo (239 kg ha⁻¹).

Tabla 4.2. Efecto del sistema de laboreo en el rendimiento del girasol. Años 2003-04, 2004-05.

Sistema de laboreo	Año		Media
	2003-04	2004-05	
		Kg ha ⁻¹	
No laboreo	1059a*	239a	649a
Laboreo	1244a	0b	622b
Media	1151 A	119 B	635

* Letras diferentes en cada columna representan la existencia de diferencia significativa a $P < 0.05$ de acuerdo con la MDS.

Resultados similares fueron obtenidos por López-Bellido *et al.*, (2002) en un estudio de 9 años en el mismo experimento. Dichos autores sólo encontraron diferencias significativas de rendimiento en función del sistema de laboreo en 2 de los 9 años estudiados. En el año más seco de los 9 estudiados el no laboreo fue más productivo, mientras que en el año más húmedo lo fue el laboreo convencional. La abundante precipitación ocurrida en febrero de la campaña 2003-04 tuvo un efecto negativo en el rendimiento en grano, consecuencia de las condiciones de saturación del suelo que se produjeron, sobre todo si coincidieron con las etapas más tempranas del cultivo. Blamey *et al.* (1997) reportaron que el girasol es más sensible al encharcamiento en suelos pesados debido a la falta de aireación. López-Bellido *et al.*, (2002) encontraron una regresión significativa entre la lluvia caída de octubre a mayo y el rendimiento de grano. Cuando la precipitación en este periodo supera los

700 mm los mayores rendimientos se alcanzan en laboreo convencional, mientras que con valores inferiores es en el no laboreo donde el girasol se muestra más productivo. En concordancia con estos autores los resultados se ajustaron a la tendencia general registrada en el experimento. En el año 2003-04 la lluvia registrada entre octubre y mayo fue de 747 mm, obteniéndose unos rendimientos de 1244 kg ha⁻¹ y 1059 kg ha⁻¹ en laboreo convencional y no laboreo respectivamente (Tabla 4.2). En el año 2004-05 las lluvias registradas en el mismo periodo no superaron los 330 mm, obteniendo únicamente 239 kg de grano por hectárea en el no laboreo (Tabla 4.2).

4.3.2 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA RADICULAR

4.3.2.1 EXTRACCIÓN MANUAL

El sistema de laboreo influyó en la densidad radicular del girasol (Figura 4.11), aunque sólo se registraron diferencias significativas en la densidad del perfil 30-40 cm (Tabla XVII). En el no laboreo la densidad radicular máxima se alcanzó en el perfil comprendido entre los 0 y 10 cm de profundidad, mientras que en el laboreo convencional la mayor densidad de raíces se registró entre los 10 y 20 cm. Similares resultados fueron obtenidos por Merrill *et al.* (2002). El sistema de laboreo no influyó significativamente en la densidad total registrada a lo largo del perfil (Figura 4.11). La profundidad máxima alcanzada por el sistema radicular estuvo entorno a 85 cm, sin que existieran diferencias entre sistemas de laboreo. Similares resultados fueron obtenidos por Merrill *et al.* (2002). Según estos autores el sistema radicular del girasol puede alcanzar profundidades de hasta 1.60 m, la cual se encuentra directamente relacionada con la cantidad de agua presente en el perfil.

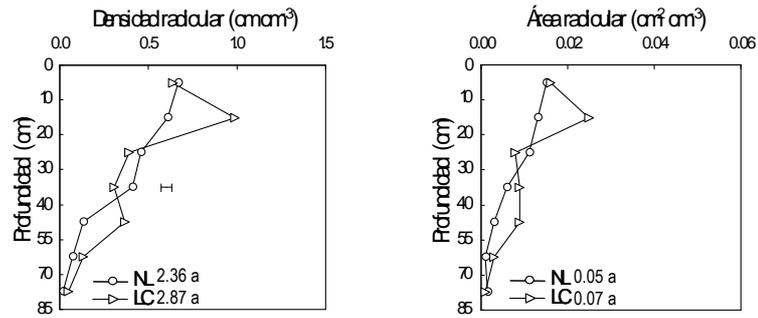


Figura 4.11. Efecto del sistema de laboreo en la densidad y área radicular del girasol en el año 2003-04. En el interior de la figura se muestran los valores correspondientes a la totalidad del perfil (0-85 cm). NL: no laboreo; LC: laboreo convencional. Barras horizontales representan diferencias significativas ($P < 0.05$) por perfiles y letras diferentes representan diferencias significativas ($P < 0.05$) en el perfil completo (0-85cm).

El área radicular del girasol no estuvo influenciada por el sistema de laboreo (Figura 4.11; tabla XVIII). Las variaciones registradas estuvieron en concordancia con las registradas en la densidad radicular, por lo que el diámetro medio de las raíces fue similar entre perfiles y sistemas de laboreo.

El sistema de laboreo no tuvo un marcado efecto sobre la biomasa radicular del girasol, con diferencias significativas sólo en la cantidad de raíces registrada en el perfil 55-70 cm (Figura 4.12). La tendencia de crecimiento manifestada en la densidad radicular también se reflejó en la acumulación de materia seca por el sistema radicular en los diferentes perfiles de suelo. La cantidad total de raíces presentes en el perfil completo fue de 1348 kg ha^{-1} en laboreo convencional y 976 kg ha^{-1} en no laboreo, sin que existieran diferencias significativas entre ambos (Figura 4.12).

El sistema de laboreo influyó significativamente en la cantidad de N aportado con las raíces en el perfil 55-70 cm. Estas diferencias no se debieron a las distintas concentraciones de N en la raíz, que a pesar de variar de forma significativa con la profundidad, no lo hicieron con el sistema de laboreo (Tabla XXI).

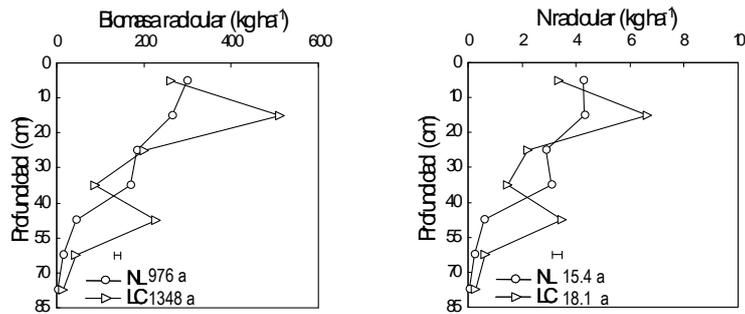


Figura 4.12. Efecto del sistema de laboreo en la biomasa y N radicular del girasol en el año 2003-04. En el interior de la figura se muestran los valores correspondientes a la totalidad del perfil (0-85 cm). NL: no laboreo; LC: laboreo convencional. Barras horizontales representan diferencias significativas ($P < 0.05$) por perfiles y letras diferentes representan diferencias significativas ($P < 0.05$) en el perfil completo (0-85cm).

Las diferencias de biomasa registradas en ese perfil pudieron generar esta variación en el N aportado (Figura 4.12). La cantidad de N aportado por las raíces en el perfil completo (0-85 cm) tampoco estuvo influenciada por el sistema de laboreo, aunque se aprecia una tendencia a aumentar en el laboreo convencional (18.1 kg N ha⁻¹) sobre el no laboreo (15.4 kg N ha⁻¹). En el laboreo convencional se produce una mayor acumulación de N entre los 10-20 cm. La aireación producida por las labores de cultivo aumenta la velocidad de mineralización de los residuos radiculares. Halvorson *et al.* (1999) encontraron niveles de NO₃-N en el suelo superiores para girasol en laboreo convencional, atribuyendo este hecho a un aumento en la mineralización. López-Bellido y López-Bellido (2001) en un estudio de 3 años en el mismo experimento determinaron una tasa de mineralización del N de 47 kg ha⁻¹, sin que existieran diferencias con la tasa mas elevada registrada (trigo-barbecho, 52 kg ha⁻¹). Sin embargo, esta mayor cantidad de N disponible para el cultivo de trigo al siguiente año no mejora el rendimiento de grano ni el contenido de proteínas del mismo (López-Bellido *et al.*, 1996).

4.3.2.2 MINIRHIZOTRON

La longitud radicular del girasol estuvo influenciada por el sistema de laboreo (Tabla XLIII). Ésta en el no laboreo fue superior en el perfil 16-33 cm cuando el cultivo se encontraba en el estado fenológico de botón floral. Los resultados obtenidos mediante este sistema y el lavado manual no difirieron para el perfil 16-33 cm. Las diferencias de densidad radicular registradas en los 10-20 cm de profundidad no tuvieron una correspondencia con los datos observados en el minirizotron. La alta variabilidad del sistema radicular manifestada por diversos autores (van Noordwijk *et al.*, 1985) podría explicar este hecho. En la totalidad del perfil (0-98 cm) el no laboreo muestra una tendencia a mejorar la longitud radicular (Figura 4.13), que no se correspondió con los datos obtenidos de la extracción manual (Figura 4.11). La falta de precisión y reproducibilidad del método de lavado expuesta por diferentes autores (Kucke *et al.*, 1995; Jackson *et al.*, 1996) reduce la posibilidad de comparación de datos obtenidos por otros métodos. Además, existe una subestimación de la producción de raíces finas existiendo una clara relación inversa entre el tamaño del tamiz empleado y las raíces finas recuperadas (Gathumbi, 2004). En este estudio se empleó un tamiz de 0.5 mm, por lo que un alto porcentaje de raíces de diámetro inferior no fueron recogidas. Esto explicaría también las diferencias encontradas entre métodos. Las raíces alcanzaron una profundidad de 98 cm, con una mayor longitud radicular (no significativa) en el no laboreo. La menor profundidad detectada mediante el lavado manual se debió a que el fuerte crecimiento en profundidad se produjo tras la floración, y los cilindros de suelo fueron tomados al inicio de la misma.

La superficie radicular proyectada (Figura 4.14) estuvo influenciada por el sistema de laboreo en los perfiles 0-16 cm, 16-33 cm y 49-65 cm. El no laboreo favoreció el incremento de la superficie radicular en el perfil 0-16 cm en la madurez fisiológica. De igual forma aumentó la superficie radicular en el perfil 16-33 cm en el estado de botón floral. Existió una correspondencia clara de este parámetro con la longitud radicular. El laboreo convencional aumentó la superficie radicular en el perfil 49-65 cm cuando el dorso del capitulo inició el cambio de color de verde a amarillo.

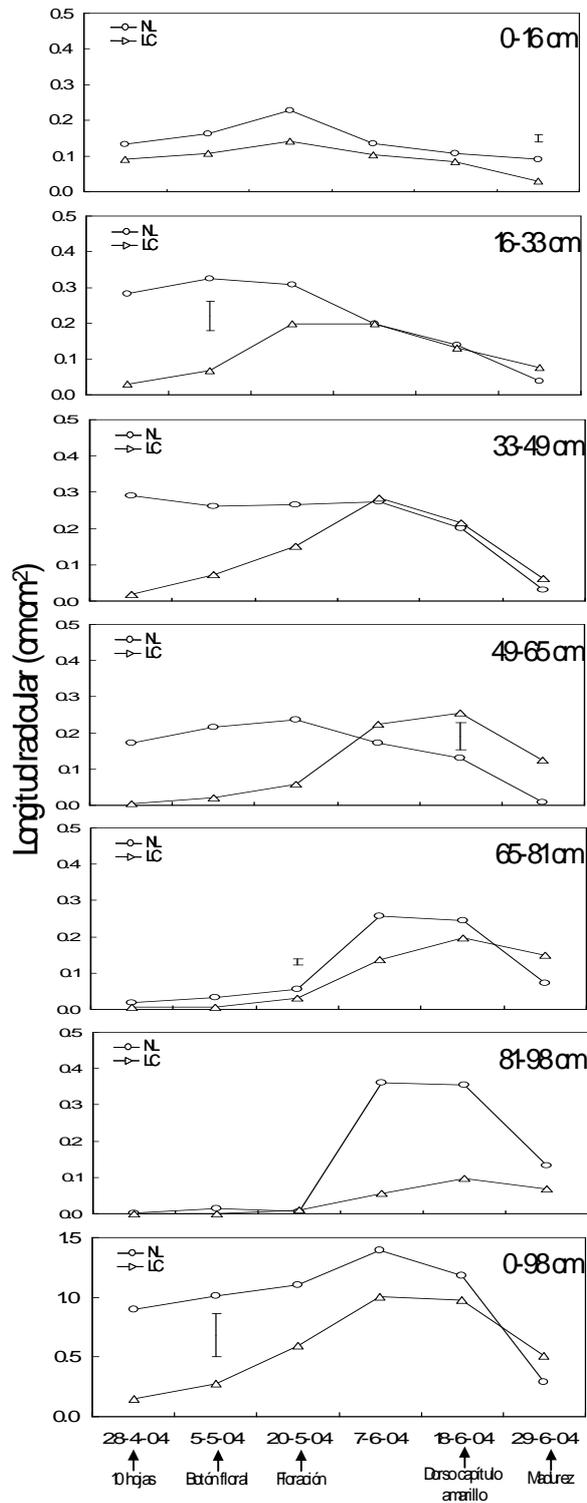


Figura 4.13 Efecto del sistema de laboreo en la longitud radicular del girasol en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo convencional)

La superficie radicular proyectada de la totalidad del perfil (0-98 cm) fue influenciada por el sistema de laboreo, siendo mayor superior en el no laboreo en el estado de botón floral y significativamente menor en el estado de madurez fisiológica (Figura 4.14).

La superficie radicular total (Figura 4.15) estuvo afectada por el sistema de laboreo en los mismos perfiles y estados fenológicos del cultivo que la superficie proyectada, exceptuando el perfil 49-65 cm. La superficie radicular total del perfil completo (0-98 cm) también estuvo influenciada por el sistema de laboreo, coincidiendo con la longitud radicular observada en el mismo perfil. Los máximos valores fueron alcanzados por el no laboreo entre los estados de botón floral y dorso de capítulo amarillo, con valores entorno a $2 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$ y $1 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$ en no laboreo y laboreo convencional respectivamente.

El diámetro radicular (Figura 4.16) tampoco estuvo influenciado de forma significativa por el sistema de laboreo en ninguno de los perfiles ni estados fenológicos estudiados (Tabla XLVI). La tendencia a un mayor engrosamiento de las raíces en el no laboreo en las etapas iniciales del cultivo desaparece prácticamente a partir de floración, exceptuándose el perfil 81-98 cm, donde el diámetro radicular en no laboreo tiende a ser superior hasta el final del cultivo. El diámetro radicular medio a lo largo del perfil (0-98 cm) fue similar para los dos sistemas de laboreo, y constante a lo largo de la estación de crecimiento del cultivo. El 100 % de las raíces tuvieron un diámetro medio comprendido entre los 0.02 y 0.06 mm.

El volumen radicular del girasol (Figura 4.17) sólo presentó diferencias significativas debido al sistema de laboreo en el perfil 0-16 cm en maduración, y en el volumen radicular del perfil completo en estado de botón floral, con valores de $1.5 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2}$ y $0.5 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-2}$ en no laboreo y laboreo convencional respectivamente. El volumen radicular descendió a partir de las observaciones del 7 de junio, correspondientes al final de la floración (Figura 4.16).

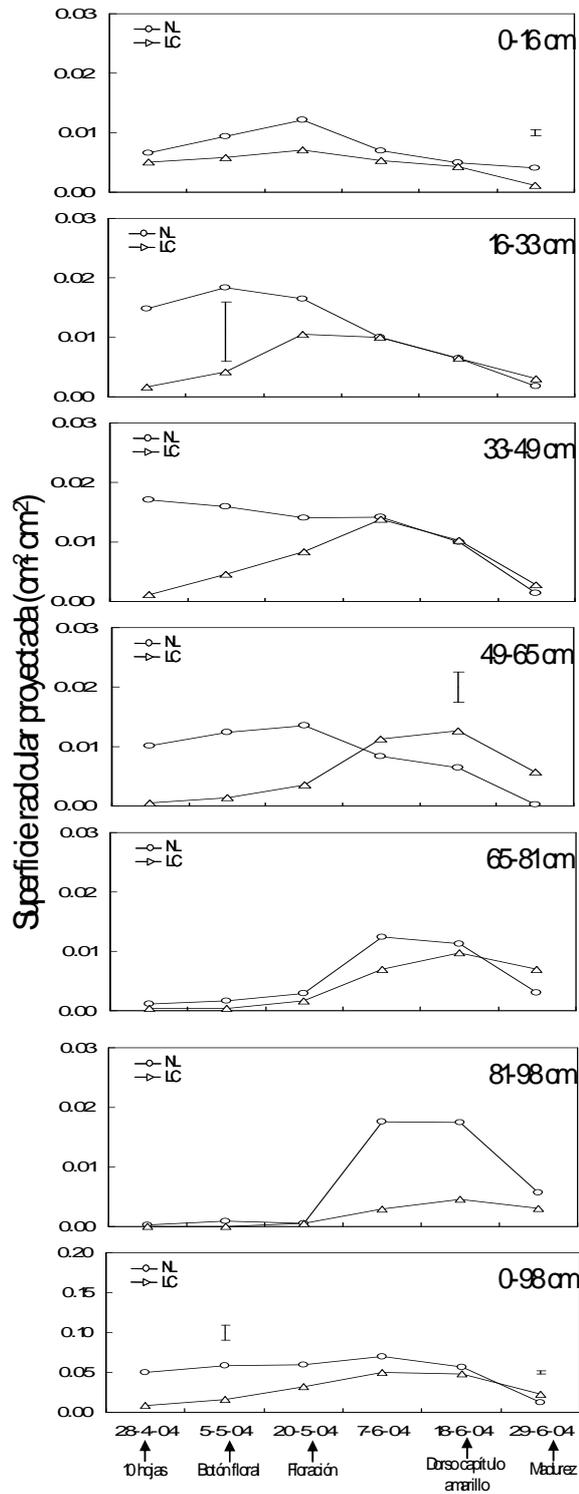


Figura 4.14 Efecto del sistema de laboreo en la superficie radicular proyectada del girasol en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo)

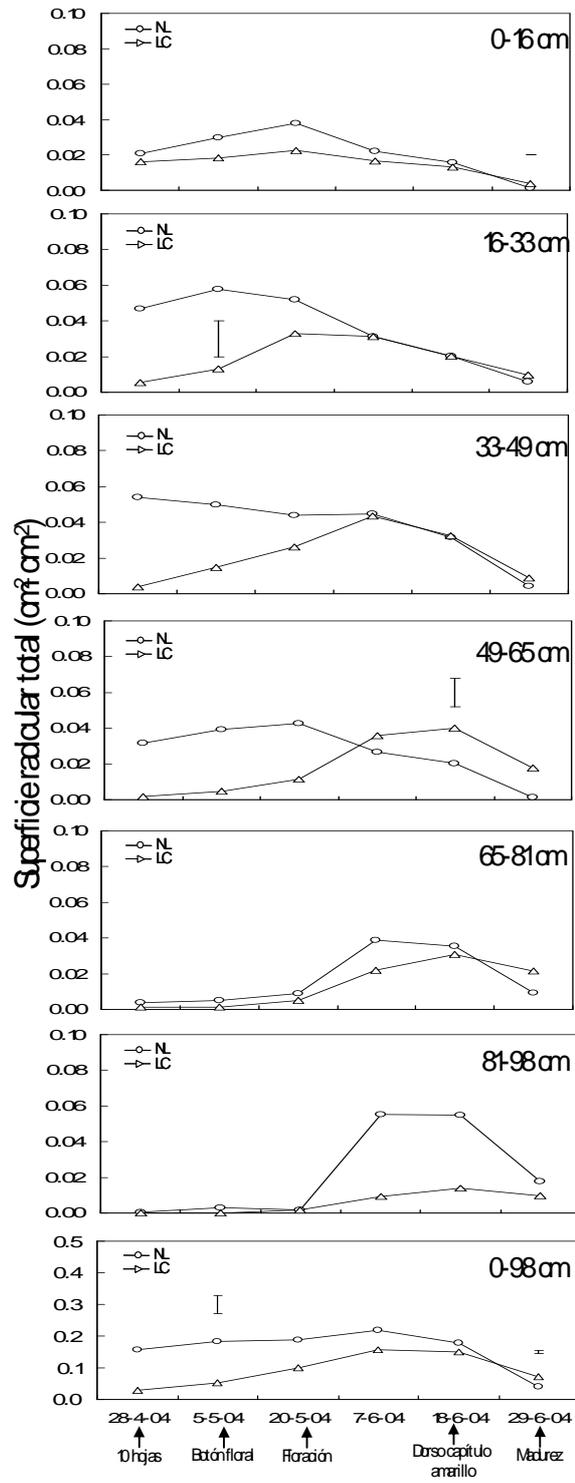


Figura 4.15 Efecto del sistema de laboreo en la superficie radicular total del girasol en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo convencional)

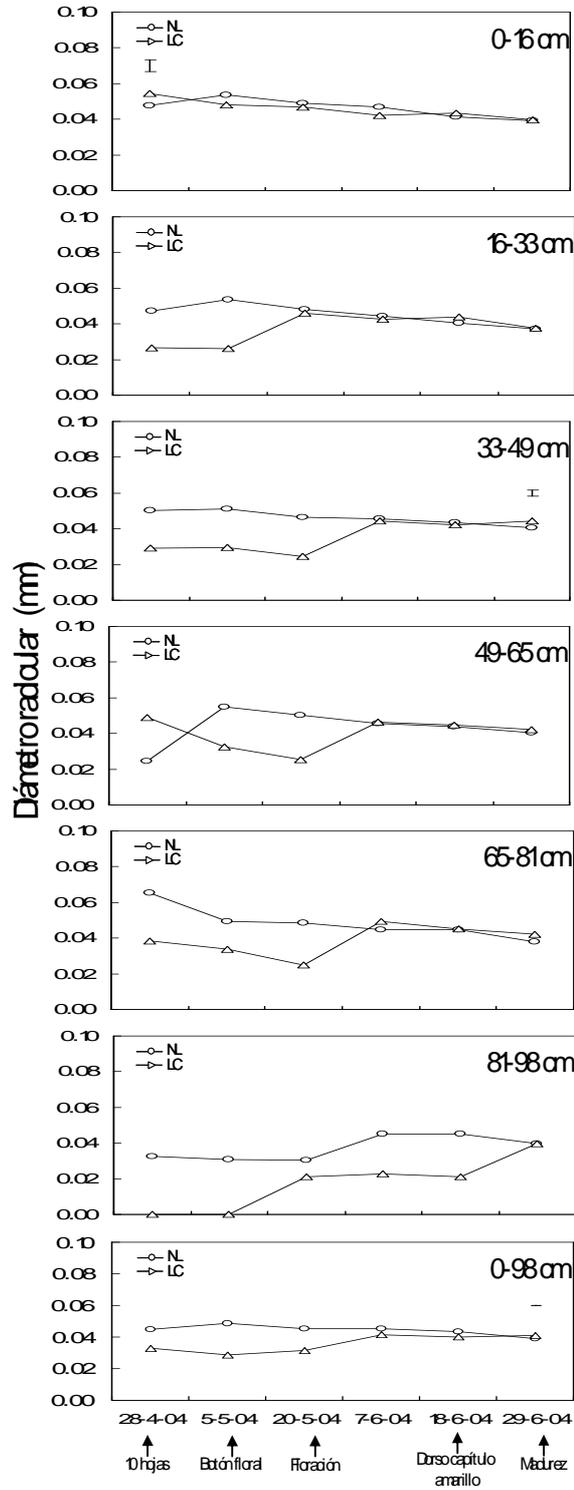


Figura 4.16 Efecto del sistema de laboreo en el diámetro radicular del girasol en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo convencional)

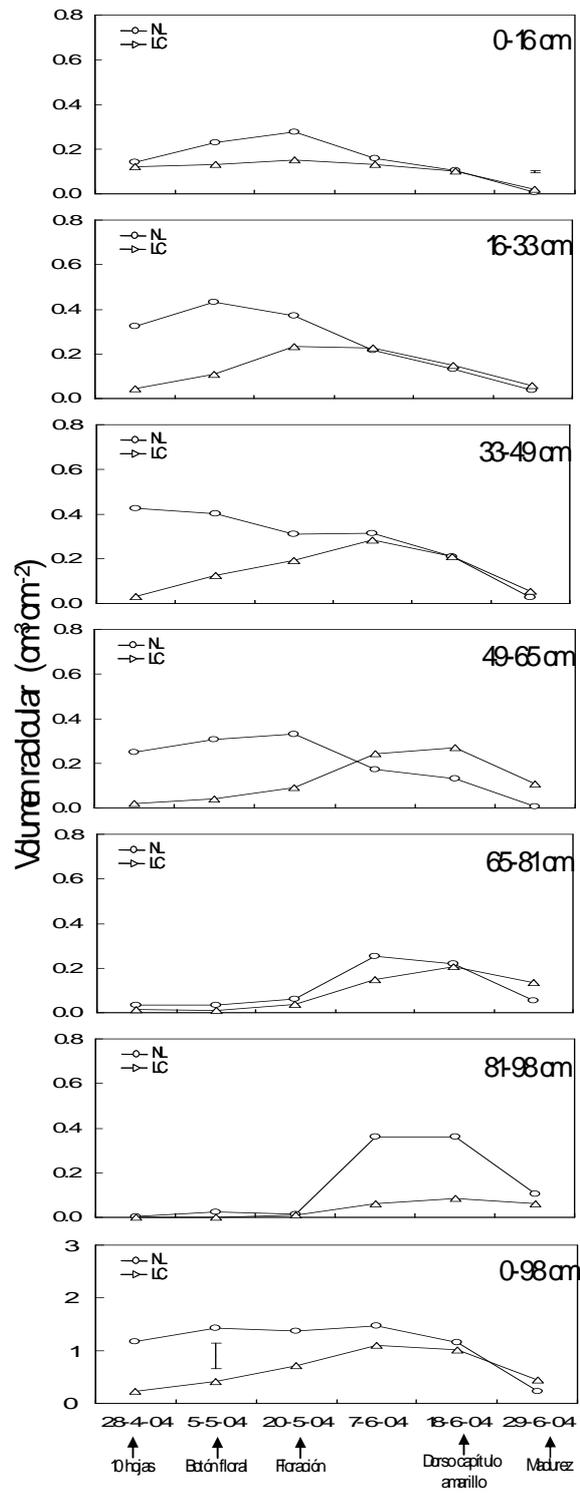


Figura 4.17 Efecto del sistema de laboreo en el volumen radicular del girasol en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo convencional)

Se realizó una correlación (no mostrada) entre la densidad y área radicular del girasol en floración obtenidas mediante la extracción manual y la densidad radicular equivalente y superficie radicular proyectada obtenida mediante las observaciones de a través del minirizotron y transformadas según la ecuación de Merrill y Upchurch (1994). A pesar de los elevados coeficientes de variación se encontró una correlación significativa para la densidad radicular obtenida por ambos métodos ($r = 0.5^*$; $n = 24$) así como para el área radicular ($r = 0.45^*$; $n = 24$).

4.4 GARBANZOS

4.4.1 RENDIMIENTO

El rendimiento del garbanzo sólo pudo ser evaluado en la campaña 2004-05, debido a que en la campaña 2003-04 no existió cosecha por una intensa infestación de *Fusarium* (*Fusarium oxisporum*) en la mayoría de las parcelas del experimento. Las escasas lluvias que se registraron en el segundo año tuvieron importancia en el rendimiento final de grano. La precipitación registrada entre los meses de diciembre y febrero (los más importantes tras el periodo de barbecho) y el mes de mayo (estado de floración y llenado del grano) alcanzó los 141 mm (Figura 4.1). Según López-Bellido *et al.* (2004), en un trabajo de 14 años en el mismo experimento, los peores rendimientos se obtuvieron cuando las lluvias registradas en este periodo (diciembre a febrero y mayo) estuvieron entre 104 y 177 mm, maximizándose los rendimientos cuando la lluvia caída estuvo entorno a 390 mm (en dicho periodo). Tales resultados ponen de manifiesto la importancia de las precipitaciones tanto del periodo que precede a la siembra como el del llenado del grano. Dalal *et al.* (1997) encontraron una correlación significativa entre el rendimiento y las lluvias precedentes al periodo de barbecho, mientras Miller *et al.* (2002) reportaron que las lluvias durante la fase crítica de crecimiento del garbanzo están relacionadas con el rendimiento final.

Tabla 4.3. Efecto del sistema de laboreo en el rendimiento del cultivo del garbanzo año 2004-05.

Sistema de laboreo	Kg ha ⁻¹
No laboreo	149a*
Laboreo	0b
Media	74.6

* Letras diferentes en cada columna representan la existencia de diferencia significativa a $P < 0.05$ de acuerdo con la MDS.

El sistema de laboreo influyó significativamente en el rendimiento del garbanzo (Tabla IV; figura 4.3). Estas diferencias pueden ser atribuidas a una mayor reserva de agua presente en los perfiles más superficiales del suelo que es donde el garbanzo desarrolla su sistema radicular principalmente. Según López Bellido *et al.* (2004) los mayores rendimientos en grano del garbanzo en no laboreo ocurren cuando los años son más secos, debido a que precipitaciones superiores a 400 mm en el periodo diciembre-febrero más mayo tienden a producir encharcamiento y el no laboreo ejerce un efecto negativo mayor que el laboreo convencional. Miller *et al.* (2002) resaltaron que el rendimiento del garbazo es superior en el no laboreo cuando los residuos de cosecha son empleados como “mulching”, debido a que una mayor cantidad de agua es retenida en el perfil durante la estación de crecimiento. A pesar de todo, la respuesta del garbanzo frente a diferentes sistemas de laboreo no está bien estudiada, particularmente para los Vertisoles de secano Mediterráneos (López Bellido *et al.*, 2004).

4.4.2 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA RADICULAR

4.4.2.1 EXTRACCIÓN MANUAL

Los datos obtenidos mediante extracción de cilindros de suelo y lavado manual en el garbanzo correspondieron al año 2003-04, año en el que no se obtuvo rendimiento de grano debido a la enfermedad que presentaron las plantas, por lo que el sistema radicular posiblemente presentó un crecimiento diferente respecto de un cultivo sano. El sistema de laboreo influyó significativamente en la densidad radicular del garbanzo cuando se analizó el perfil completo (0-85 cm), según se muestra en la figura 4.18. El no laboreo produjo un aumento de la densidad radicular, obteniendo 2.3 cm cm^{-3} frente a los 1.8 cm cm^{-3} alcanzados en no laboreo. A excepción del perfil 0-10 cm, la densidad radicular en laboreo convencional fue superior en todos los perfiles, aunque no se registrasen diferencias significativas, con valores inferiores a 0.1 cm cm^{-3} en todos los casos.

El área radicular del garbanzo también estuvo influenciada por el sistema de laboreo en el perfil completo (Figura 4.18), como consecuencia de la relación existente entre el área radicular y la densidad radicular.

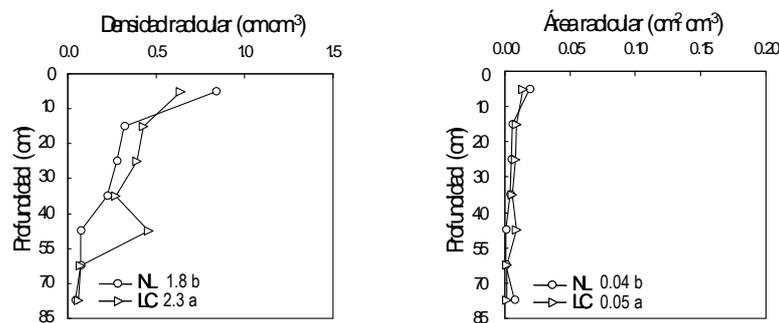


Figura 4.18. Efecto del sistema de laboreo en la densidad y área radicular del garbanzo en el año 2003-04. En el interior de la figura se muestran los valores correspondientes a la totalidad del perfil (0-85 cm). NL: no laboreo; LC: laboreo convencional. Barras horizontales representan diferencias significativas ($P < 0.05$) por perfiles y letras diferentes representan diferencias significativas ($P < 0.05$) en el perfil completo (0-85cm).

Los valores registrados fueron similares entre todos los perfiles estudiados, lo que supone que existieron variaciones en el diámetro radicular a lo largo de la estación de cultivo. A pesar de la posible influencia que el *Fusarium* ejerciera sobre el sistema radicular, los resultados de densidad y área radicular estuvieron en concordancia con los obtenidos por Thomas *et al.* (1995).

La biomasa radicular del garbanzo no estuvo influenciada por el sistema de laboreo, no habiendo diferencias significativas en la cantidad de raíces registrada en la totalidad del perfil 0-85 cm (Figura 4.19). La tendencia de crecimiento manifestada en la densidad radicular también se reflejó en la acumulación de materia seca por el sistema radicular en los diferentes perfiles de suelo. La cantidad total de raíces presentes en el perfil completo fue de 365 kg ha⁻¹ en laboreo convencional y 446 kg ha⁻¹ en no laboreo, sin que existieran diferencias significativas entre ambos (Figura 4.19).

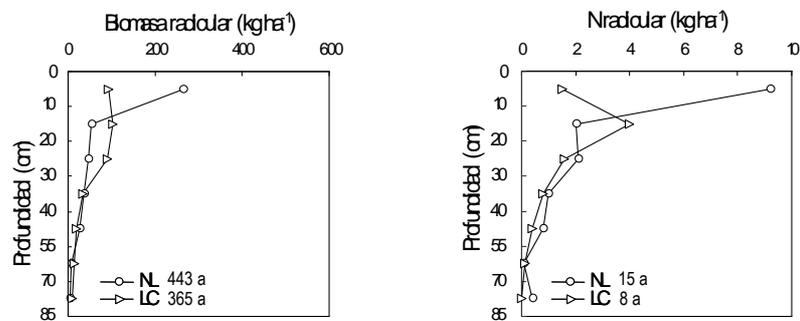


Figura 4.19. Efecto del sistema de laboreo en la biomasa y N radicular del garbanzo en el año 2003-04. En el interior de la figura se muestran los valores correspondientes a la totalidad del perfil (0-85 cm). NL: no laboreo; LC: laboreo convencional. Barras horizontales representan diferencias significativas (P<0.05) por perfiles y letras diferentes representan diferencias significativas (P<0.05) en el perfil completo (0-85cm).

El sistema de laboreo no afectó significativamente en la cantidad de N aportado con las raíces (Tabla XVI). La concentración de N en la raíz, que varió de forma significativa con la profundidad, no influyó en la cantidad de N aportado por el garbanzo en los diferentes perfiles (Tabla XXI). Las diferencias de biomasa registradas en el perfil 0-10 cm pudieron generar esta variación en el N aportado en

el mismo (Figura 4.19). La cantidad de N aportado por las raíces en el perfil completo (0-85 cm) tampoco estuvo influenciada por el sistema de laboreo, aunque se aprecia una tendencia a aumentar en el no laboreo (15 kg N ha^{-1}) sobre el laboreo convencional (8 kg N ha^{-1}).

4.4.2.2 MINIRHIZOTRON

La longitud radicular del garbanzo estuvo afectada por el sistema de laboreo (Tabla XLIII). El laboreo convencional fue superior en el perfil 0-16 cm cuando el cultivo se encontraba en floración (Tabla 4.20). Esta tendencia se mantuvo también en el perfil 49-65 cm en la etapa de aparición de hojas. Se encontraron diferencias significativas en el perfil 13-33cm, mayores hasta floración y significativamente más bajas en no laboreo a partir de este momento, donde la densidad disminuyó de forma progresiva hasta alcanzar valores mínimos en la madurez fisiológica del cultivo. Los resultados obtenidos mediante este sistema y el lavado manual difirieron para todos los perfiles estudiados. Las diferencias de densidad radicular registradas en los 0-10 y 40-55 cm de profundidad no tuvieron una correspondencia con los datos observados en el minirhizotron. Sin embargo, el patrón de crecimiento observado mediante el minirhizotron se ajusta mejor al aportado por Thomas *et al.* (1995), que manifestó que las raíces del garbanzo aumentaron su longitud radicular hasta la floración, momento a partir del cual iniciaban un descenso contenido hasta la madurez total del grano. Las raíces alcanzaron una profundidad máxima de 81 cm (Figura 4.20), sin que existieran diferencias significativas entre sistemas de laboreo. Estas observaciones coincidieron con las obtenidas mediante la extracción manual (Figura 4.18). La longitud radicular varió según el sistema de laboreo cuando se consideró el perfil completo (0-98 cm), donde el no laboreo fue significativamente menor en la madurez del grano (Figura 4.20). Las raíces en este sistema mostraron una menor vida media, lo cual se reflejó como un rápido descenso de la longitud radicular.

La superficie radicular proyectada estuvo influenciada por el sistema de laboreo en los perfiles 0-16 cm, 16-33 cm y 49-65 cm (Tabla XXXIX).

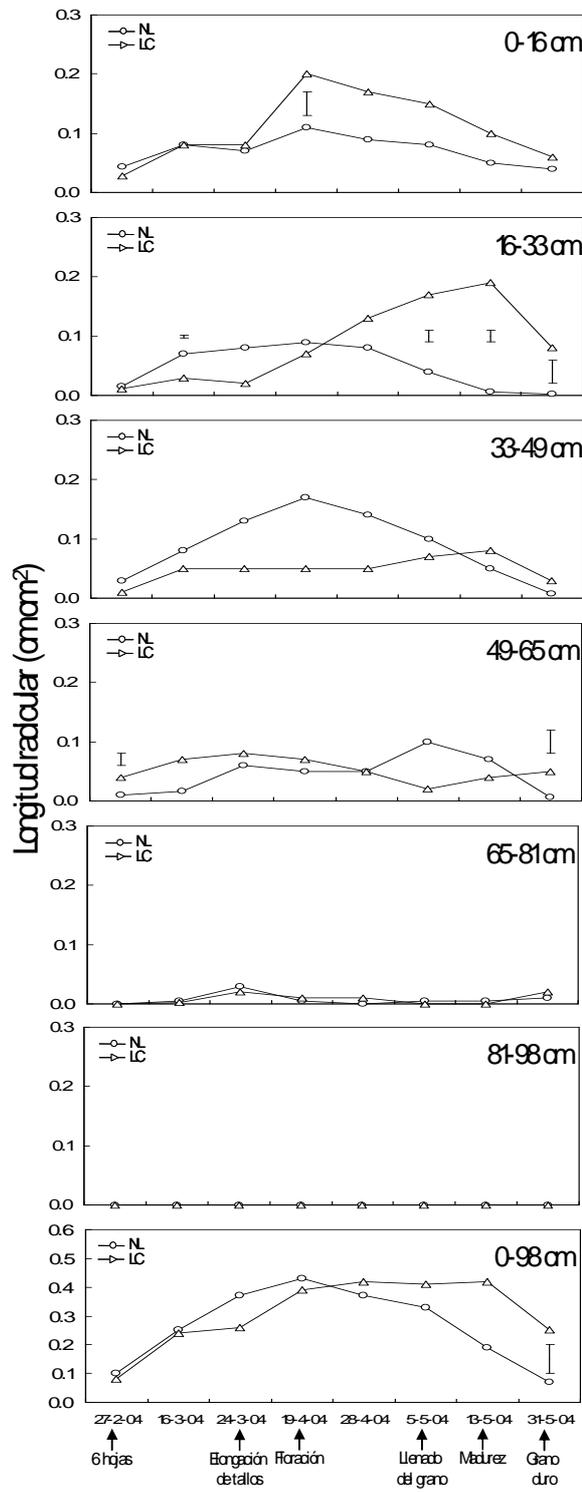


Figura 4.20 Efecto del sistema de laboreo en la longitud radial del garbanzo en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo convencional)

El laboreo convencional favoreció significativamente el incremento de la superficie radicular en todos los perfiles indicados (Figura 4.21). En el perfil 33-49 cm del no laboreo las raíces mostraron una tendencia a incrementar su superficie con respecto al laboreo convencional. Existió una correspondencia clara de este parámetro con la longitud radicular. El incremento de longitud radicular detectado en el perfil 13-33 cm del laboreo convencional (Figura 4.20) no se correspondió con un aumento de la superficie en ese perfil, lo que indica que las raíces disminuyeron su diámetro a medida que avanzó la estación de crecimiento. La superficie radicular proyectada de la totalidad del perfil (0-98 cm) fue afectada por el sistema de laboreo solo cuando el cultivo se encontró en la fase de grano duro. La superficie radicular proyectada del perfil completo alcanzó valores máximos en no laboreo entorno $0.03 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$ hasta el estado de llenado del grano (Figura 4.21), disminuyendo a partir de este momento más rápidamente que en el laboreo convencional.

La superficie radicular total (Figura 4.22) estuvo afectada por el sistema de laboreo en los mismos perfiles y estados fenológicos del cultivo que la superficie proyectada (Tablas XXXIX y XL). La superficie radicular total del perfil completo (0-98 cm) también estuvo influenciada por el sistema de laboreo, coincidiendo con la longitud radicular observada en el mismo perfil. Los máximos valores fueron alcanzados por el no laboreo entre los estados de elongación de tallos y floración, con valores entorno a $0.1 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$ (Figura 4.22). En el laboreo convencional, los mayores valores de superficie se alcanzaron entre el llenado del grano y madurez fisiológica, con valores próximos a $0.1 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$. De acuerdo con Thomas y Fukai (1995), cuando el sistema radicular del garbanzo se desarrolla tarde a consecuencia de bajas temperaturas en las etapas más tempranas de cultivo, la velocidad de extracción de agua es más lenta y a menudo en la cosecha existe agua disponible para el cultivo en el perfil de suelo que no ha sido aprovechada por el mismo.

El diámetro radicular estuvo influenciado de forma significativa por el sistema de laboreo (Tabla XLI), presentando diferencias significativamente superiores en no laboreo para los perfiles 0-16 cm y 49-65 cm (Figura 4.23). La tendencia a un mayor engrosamiento de las raíces en el no laboreo no favorece la relación capacidad de absorción y carbono empleado en la formación de raíces

(Fitter, 1991, 1996; Yanai *et al.*, 1995). El diámetro radicular medio a lo largo del perfil (0-98 cm) fue similar para los dos sistemas de laboreo, y constante a lo largo de la estación de crecimiento del cultivo. El 100 % de las raíces tuvieron un diámetro medio comprendido entre los 0.05 y 0.1 mm.

El volumen radicular del garbanzo (Figura 4.24) presentó diferencias significativas debido al sistema de laboreo en los primeros perfiles de suelo estudiados (Tabla XLII). El volumen de raíces fue superior en el laboreo convencional en los perfiles 0-16 cm, 16-33 cm y 49-65 cm (Figura 4.24). Entre 0-33 cm las raíces presentan un volumen mayor en laboreo convencional a partir de floración, con diferencias significativas en todas las observaciones realizadas a partir de ese momento. En el perfil 49-65 cm el volumen radicular fue significativamente superior en laboreo convencional al inicio y al final del cultivo (Figura 4.24). En el perfil 33-49 cm el volumen de raíces fue superior en el no laboreo, aunque sin diferencias significativas. El 97 % del volumen de raíces estuvo concentrado en los primeros 65 cm de suelo. Según Benjamín y Nielsen (2006), el sistema radicular del garbanzo responde al déficit de agua incrementando la profundidad de las raíces en el perfil. Las abundantes lluvias en la estación de crecimiento y los problemas de *Fusarium* pudieron reducir la profundidad máxima alcanzada por las raíces, inferior a la alcanzada por el garbanzo en condiciones de estrés de humedad en suelos Vertisoles (Benjamín y Nielsen, 2006; Kashiwargi *et al.*, 2006). Cuando se estudió la totalidad del perfil (0-98 cm) el volumen de raíces no presentó diferencias significativas entre sistemas de laboreo, mostrando una tendencia a incrementar en no laboreo en las etapas más tempranas del cultivo.

Se realizó una correlación (no mostrada) entre la densidad y área radicular del girasol en floración obtenidas mediante el lavado manual y la densidad radicular equivalente y superficie radicular proyectada obtenida mediante las observaciones de a través del minirizotron y transformadas según la ecuación de Merrill y Upchurch (1994). No se encontró ninguna correlación significativa para la densidad radicular ($r = 0.31$; $n = 24$) ni para el área radicular ($r = 0.32$; $n = 24$).

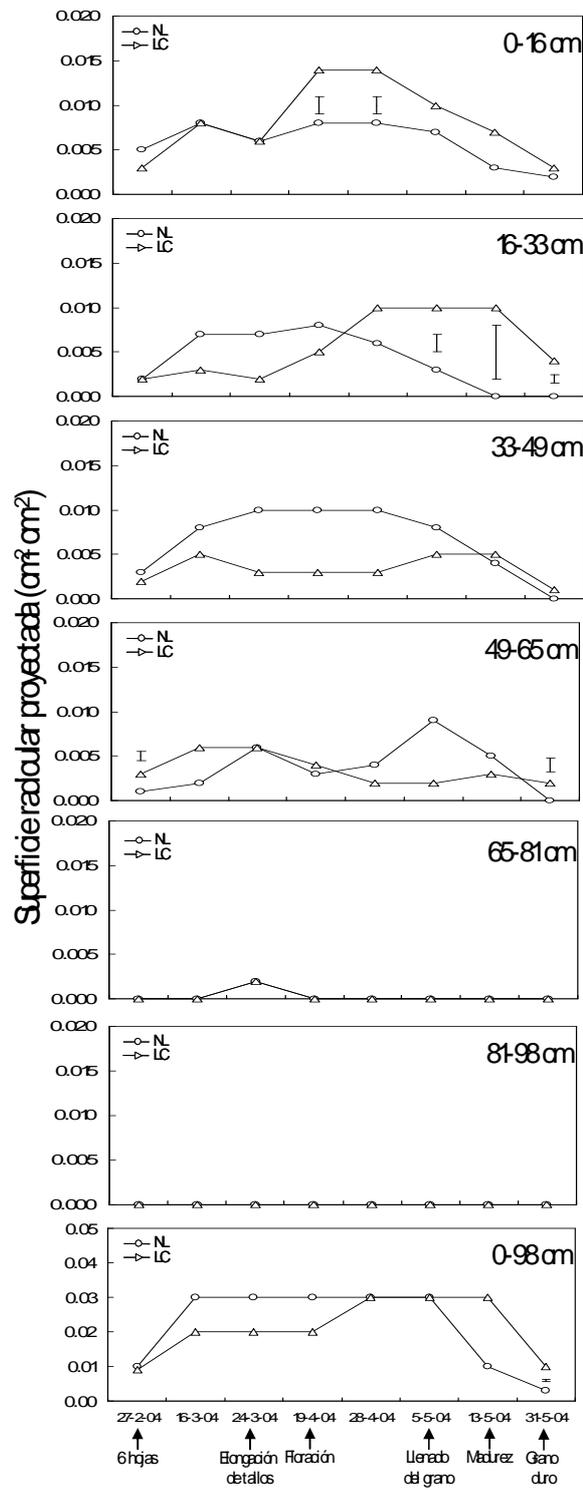


Figura 4.21 Efecto del sistema de laboreo en la superficie radicular proyectada del garbanzo en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo)

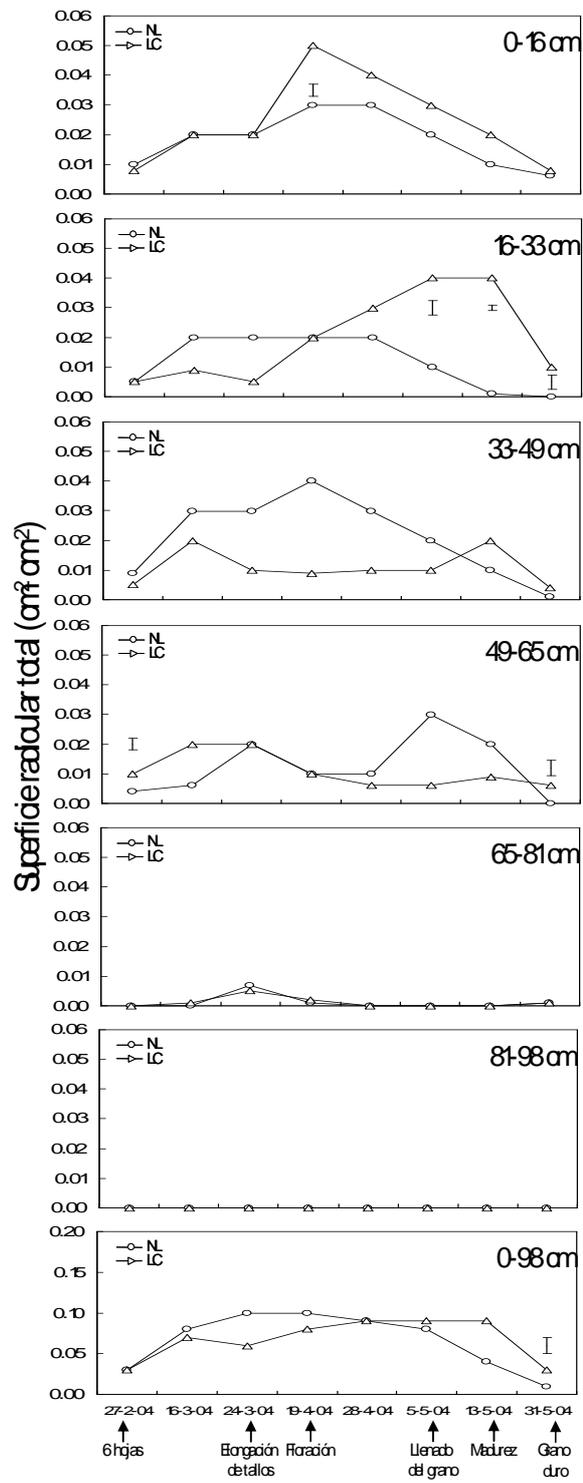


Figura 4.22 Efecto del sistema de laboreo en la superficie radicular total del garbanzo en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo convencional)

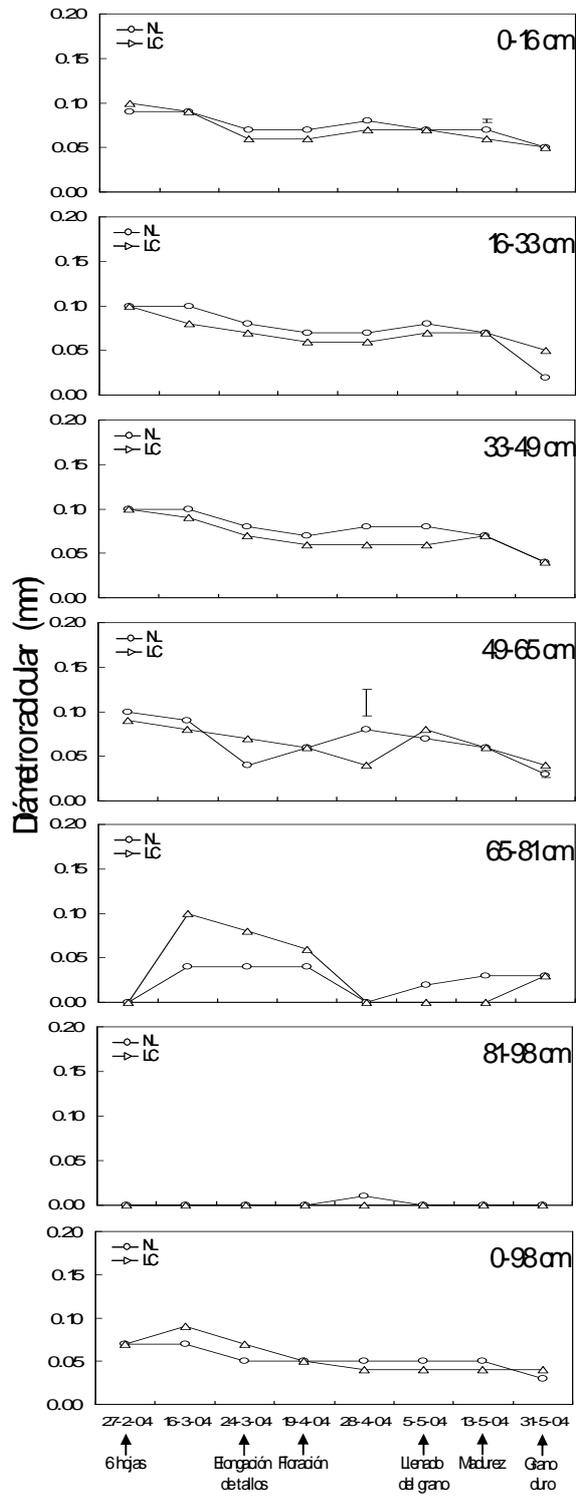


Figura 4.23 Efecto del sistema de laboreo en el diámetro radicular del garbanzo en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo convencional)

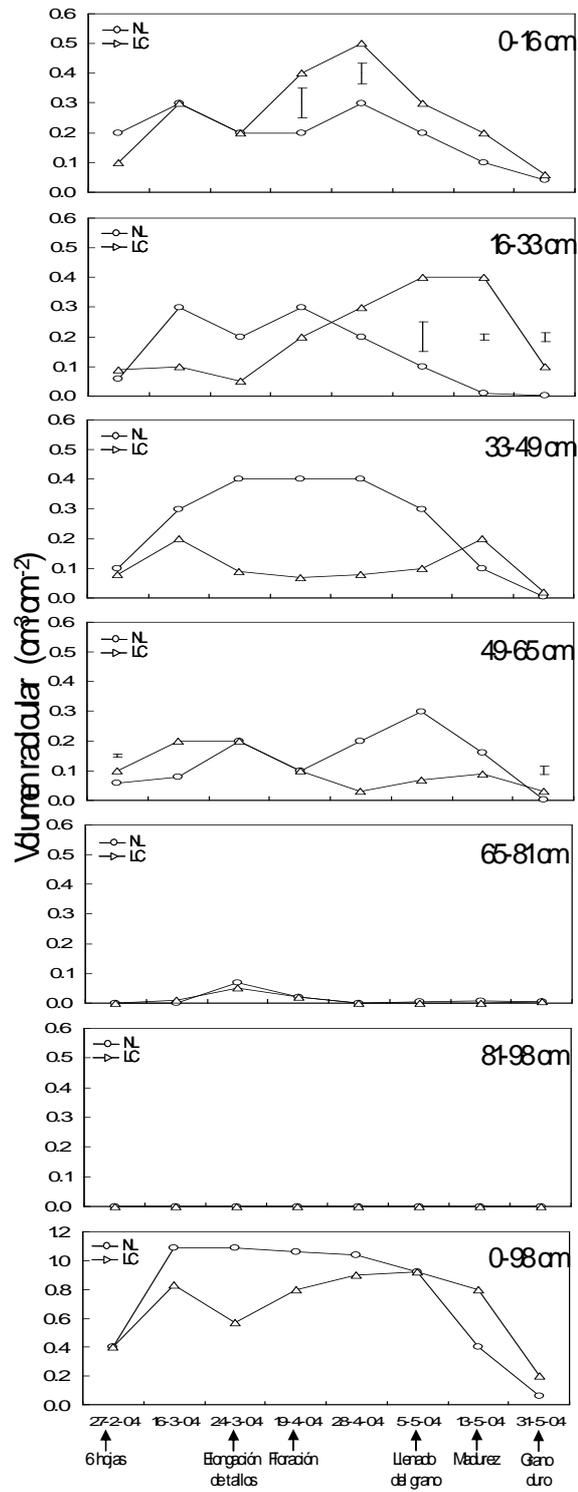


Figura 4.24 Efecto del sistema de laboreo en el volumen radicular del garbanzo en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo convencional)

4.4.3 APORTE DE N AL SISTEMA.

4.4.3.1 FIJACIÓN DE N₂

El porcentaje de N derivado de la fijación atmosférica de N₂ (NDA) representó el único valor comparable entre sistemas de laboreo (Tabla 4.4). La media total de ambos años del NDA estimada mediante el método de la abundancia natural de ¹⁵N (AN) fue 46.2 %, y el NDA estimado mediante el método del enriquecimiento con ¹⁵N (DI: dilución isotópica de ¹⁵N) fue 71 % (Tabla 4.4) sin que existieran diferencias significativas en el NDA estimado por ambos métodos (Tabla IL). Similares resultados fueron obtenidos por Unkovich y Pate (2000). Sin embargo, en el año 2003-04 se encontraron diferencias significativas del NDA estimado por sendos métodos, con valores de 83.4 % de NDA y 38.1 % de NDA según la DI y AN respectivamente. Aunque la técnica de la abundancia natural no es aplicable a todas las situaciones, las directrices para un uso juicioso del método están bien establecidas (Unkovich *et al.*, 1994; Peoples *et al.*, 1997). Un importante problema de esta metodología es el requerimiento de un valor “B”, definido como el valor de $\delta^{15}\text{N}$ para una leguminosa cuando depende completamente de la fijación para su crecimiento. Bajo unas condiciones de completa dependencia simbiótica, el N presente en la planta está típicamente reducido en ¹⁵N respecto del N₂ atmosférico. De esta manera, las estimaciones de fijación de N₂ por leguminosas basadas en los valores $\delta^{15}\text{N}$ de la biomasa de la parte aérea respecto al ¹⁵N de una planta de referencia no leguminosa, sobreestimarán el % NDA a no ser que el valor B se tenga en cuenta (Shearer y Kohl, 1986). Debido a que el valor B varía con la especie, edad y condiciones de cultivo de la planta (Unkovich y Pate, 1998; Ledgard, 1989) un único valor B no puede utilizarse para todas las leguminosas y condiciones ambientales. Tanto Unkovich *et al.* (1994) como Peoples *et al.* (1997) han indicado que la magnitud de los errores en la estimación de fijación por AN están asociados a la determinación y aplicación del valor B. Como norma general, se acepta que para estimaciones de NDA menores al 85 % los errores asociados a una falta de precisión del valor B usado no son significativos (Unkovich *et al.*, 1994). En cambio, la estimación de la fijación mediante la DI es más fiable cuando se dan altos porcentajes de NDA.

Tabla 4.4. Efecto del año y sistema de laboreo en la estimación de la fijación de N₂ por el garbanzo mediante el método de la abundancia natural de ¹⁵N y del enriquecimiento en ¹⁵N.

Año	Sistema de Laboreo	Abundancia natural ¹⁵ N				Enriquecimiento ¹⁵ N			
		NDA ³ (%)	N ₂ Fijado (kg ha ⁻¹)	NDS ⁴ (kg ha ⁻¹)	N Aportado (kg ha ⁻¹)	NDA (%)	N ₂ Fijado (kg ha ⁻¹)	NDS (kg ha ⁻¹)	N Aportado (kg ha ⁻¹)
2003-04	No laboreo ¹	45.3 a				86.8 a			
	Laboreo ¹	31 a				80.1 a			
	Media	38.1 B				83.4 A			
2004-05	No laboreo	38.5 a	8.4	16.9	- 1.3	55.9 a	13.8	11.4	4.2
	Laboreo ²	69.8 a				61.3 a			
	Media	54.1 A				58.6 A			
Análisis conjunto	No laboreo	42 a				71.3 a			
	Laboreo	50.4 a				70.7 a			
	Media	46.2				71			

¹ No existió cosecha de garbanzos.

² No existió cosecha en las parcelas de Laboreo convencional.

³ N derivado del aire

⁴ N derivado del suelo

Letras minúsculas diferentes indican la existencia de diferencias significativas (P<0.05) entre sistemas de laboreo, y mayúsculas indican diferencias significativas (P<0.05) entre métodos de estimación.

En el año 2004-05 no existieron diferencias significativas entre los valores del NDA, con 54.1 % y 58.6 % de NDA estimados según la AN y DI respectivamente (Tabla 4.4), en concordancia con los resultados obtenidos por López-Bellido *et al.* (2006). De acuerdo con Unkovich y Pate (2000), estas diferencias entre los porcentajes de NDA se encuentran dentro del rango de fiabilidad que existe entre ambos métodos. El sistema de laboreo tampoco influyó en el NDA en ninguno de los años estudiados. Según Carranca *et al.* (1999) la fijación de N₂ se encuentra fuertemente influenciada por el contenido de agua del suelo, sin embargo, los datos obtenidos muestran incluso con diferencias de 461 mm de lluvia entre años, los niveles de fijación no experimentan cambios significativos. En experimentos realizados con guisante en Australia y Siria por Beck *et al.*, (1991) encontraron que el rendimiento y la cantidad de N₂ fijado estuvo relacionado con el contenido de agua del suelo, pero el % NDA no estuvo afectado.

La cantidad de N₂ fijado (kg N ha⁻¹) sólo pudo ser obtenida para el no laboreo en la campaña 2004-05, sin que existieran diferencias entre ambos métodos de estimación (Tabla 4.4). La contribución del garbanzo al N del suelo estimado para ese mismo año, resultó negativa para la AN (-1.3 kg N ha⁻¹) y positiva para la DI (4.2 kg N ha⁻¹). Estos resultados fueron similares a los obtenidos por Carranca *et al.* (1999) que reportó valores comprendidos entre -17 kg N ha⁻¹ y 16 kg N ha⁻¹.

4.4.3.2 RIZODEPOSICIÓN DE N

La proporción de N en el suelo derivado de la rizodeposición (*PN_{dr}*) difirió significativamente entre sistemas de laboreo y entre los diferentes perfiles de suelo. En el laboreo convencional, el 20 % del N del suelo en los primeros 30 cm provino de la rizodeposición, difiriendo significativamente de *PN_{dr}* observada en no laboreo (5 %) (Figura 4.25). La cantidad media total de N depositado en el suelo procedente de la rizodeposición en el periodo comprendido desde la floración del cultivo hasta la senescencia fue de 189 kg N ha⁻¹ considerando la totalidad del perfil (0-90 cm). Resultados similares fueron obtenidos por Khan *et al.* (2002). El sistema de laboreo

no influyó en la cantidad de N aportado por la rizodeposición, obteniendo cantidades medias de 236 kg N ha⁻¹ y 142 kg N ha⁻¹ en laboreo convencional y no laboreo respectivamente.

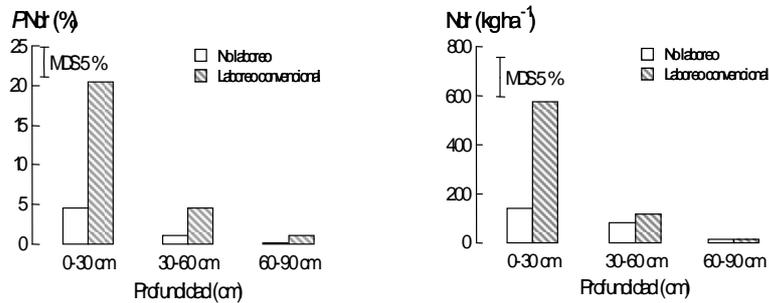


Figura 4.25. Interacción sistema de laboreo x profundidad del porcentaje de N derivado de la rizodeposición (PNdr) y la cantidad de N aportado por la rizodeposición (Ndr) en el garbanzo.

La rizodeposición de N fue significativamente distinta entre los perfiles de suelo estudiados. El 47 % del N depositado se encontró en los primeros 30 cm. El resto de los perfiles aportaron el 35 % y 18 % del N restante (30-60 cm y 60-90 cm respectivamente) (Figura 4.25). Los 30 primeros cm del laboreo convencional fueron los que se registró la mayor cantidad de N rizodepositado, aportando 576 kg N ha⁻¹. El perfil 30-60 del laboreo convencional y 0-30 del no laboreo no difirieron entre si, aportando 115 kg N ha⁻¹ y 330 kg N ha⁻¹ respectivamente, sin que existieran diferencias significativas para el resto de perfiles. La mayor cantidad de N depositado por las raíces del garbanzo en el laboreo convencional se correspondió con la mayor longitud radicular observada en los primeros 30 cm de suelo en el laboreo convencional. Este parámetro es el que mejor representa la producción de raíces finas, que son las que contribuyen en mayor medida con su rápida descomposición a la cantidad total de N rizodepositado. Además, según Khan *et al.* (2002) son las raíces finas las que experimentan un mayor enriquecimiento con ¹⁵N por lo que son más fácilmente detectables. El incremento de la longitud radicular registrado en el laboreo convencional frente al descenso observado en no laboreo en el perfil 16-33 cm a partir de floración explicaría la mayor cantidad de N encontrado en este perfil. Estos resultados pudieron ser originados por las condiciones de estrés

que el *Fusarium* impuso a las raíces del garbanzo en el laboreo convencional. Sin embargo, los rendimientos de trigo obtenidos tras el cultivo del garbanzo al año siguiente (datos no mostrados) no experimentaron incrementos significativos. Según Kessel y Hartley (2000) incrementos en la deposición de N en el suelo no reflejan necesariamente un incremento en el enriquecimiento del “pool” de N en el suelo, ya que mayores «inputs» de N conlleva un potencial aumento de las pérdidas de N debido a lavado, desnitrificación y volatilización.

4.5 HABAS

4.5.1 RENDIMIENTO

El rendimiento de las habas estuvo influenciado significativamente por las precipitaciones registradas en cada uno de los años estudiados (Figura 4.1, tabla 4.5). El mayor rendimiento de grano se obtuvo en el año más lluvioso (1448 kg ha⁻¹). López-Bellido *et al.* (2003), en un trabajo de 14 años sobre el mismo experimento, mostraron que la obtención de grano no depende sólo de la cantidad total de lluvia en la estación de cultivo sino también del patrón de distribución de las mismas a lo largo de la campaña. Según dichos autores el rendimiento final de grano incrementa a medida que lo hacen las precipitaciones que ocurren entre enero y abril. Sin embargo, los años donde las precipitaciones otoñales son muy abundantes el establecimiento del cultivo puede verse afectado a consecuencia de las condiciones de encharcamiento.

Tabla 4.5. Efecto del sistema de laboreo en el rendimiento del cultivo de las habas. Años 2003-04 y 2004-05.

Sistema de laboreo	Año		Media
	2003-04	2004-05	
	Kg ha ⁻¹		
No laboreo	1879a*	218a	1048a
Laboreo	1019b	0b	510b
Media	1449 A	109 B	779

* Letras diferentes en cada columna representan la existencia de diferencia significativa a $P < 0.05$ de acuerdo con la MDS.

El sistema de laboreo afectó significativamente al rendimiento de las habas en ambos años de estudio y el análisis conjunto (Tabla III y 4.5). El no laboreo fue más productivo en todos los casos, obteniendo 860 kg ha^{-1} más que el laboreo convencional en la campaña 2003-04. En el año más seco no hubo cosecha en las parcelas de laboreo convencional. Tales resultados difieren de los obtenidos por López-Bellido *et al.* (2003), quienes no encontraron una mejora en el rendimiento de grano en no laboreo cuando la precipitación registrada fue igual o inferior a la media de la zona.

4.5.2 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA RADICULAR

4.5.2.1 EXTRACCIÓN MANUAL

La densidad radicular de las habas no estuvo influenciada de forma significativa por las condiciones climáticas (Tabla IX). El sistema radicular de las habas, a diferencia del trigo, presentó una densidad radicular superior el año de menos precipitaciones, aunque sin diferencias significativas (Figura 4.26). El sistema de laboreo influyó de forma significativa sobre la densidad radicular en ambos años de estudio y media de los dos años cuando se consideró el perfil completo (Figura 4.26). En la campaña 2003-04 no existieron diferencias significativas en densidad radicular de ningún perfil en función del sistema de laboreo. Las raíces en el no laboreo tendieron a alcanzar la densidad máxima en los perfiles 0-10 cm (0.9 cm cm^{-3}) y 30-40 cm (0.4 cm cm^{-3}). En el laboreo convencional, las habas alcanzaron menor densidad radicular (sin diferencias significativas), experimentando un acusado descenso a partir del perfil 20-30 cm. El incremento de rendimiento obtenido en el no laboreo podría haber estado beneficiado por la mayor densidad radicular detectada en el perfil 0-98 en este sistema de laboreo. Según Johansen *et al.* (1997) un sistema radicular más denso mejora la capacidad de absorción de agua y nutrientes, lo cual según Kashiwagi *et al.* (2006) contribuye significativamente a incrementar el rendimiento. En el año 2004-05, en el que las precipitaciones fueron más escasas, el sistema radicular respondió con un aumento en la densidad radicular de todos los perfiles, con diferencias significativas en el perfil 55-70 cm a favor del no laboreo. El

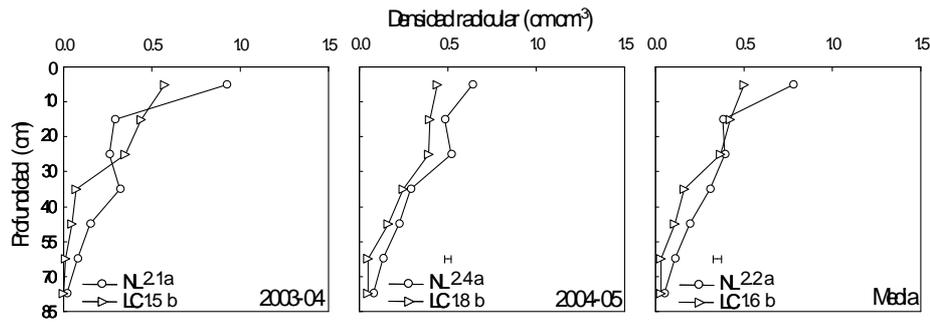


Figura 4.26. Efecto del sistema de laboreo en la densidad radicular de las habas en los años 2003-04 y 2004-05. En el interior de la figura se muestran los valores correspondientes a la totalidad del perfil (0-85 cm). NL: no laboreo; LC: laboreo convencional. Barras horizontales representan diferencias significativas ($P < 0.05$) por perfiles y letras diferentes representan diferencias significativas ($P < 0.05$) en el perfil completo (0-85cm).

patrón de crecimiento no difirió entre sistema de laboreo para el resto de perfiles. La densidad media de los dos años también estuvo influenciada por el sistema de laboreo en el perfil 55-70 cm, sin diferencias significativas en el resto. Igualmente, la mayor densidad radicular en la totalidad del perfil pudo favorecer la obtención de cosecha frente al laboreo convencional. La diferente capacidad de retención de agua en el no laboreo señalada por diversos autores (López-Bellido *et al.*, 2003) pudo manifestarse en un incremento de la densidad radicular. Según Gerard *et al.* (1982), la dureza del suelo (caracterizada por su densidad aparente, textura y contenido de agua) afecta linealmente al crecimiento de la raíz. En condiciones de reducida humedad en el suelo las habas muestran un gran número de ventajosas adaptaciones al estrés por sequía, tales como reducción de la altura de la planta, descenso en el tamaño del área foliar y fuerte incremento de del crecimiento de la raíz (Husain *et al.*, 1990).

El área radicular de las habas no fue influenciada de forma significativa por las condiciones climáticas (Tabla X). El sistema de laboreo no alteró el área radicular del año más húmedo cuando se estudió por perfiles (Figura 4.27). El no laboreo incrementó significativamente el área radicular del perfil completo, alcanzando $0.04 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-3}$ frente a $0.03 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-3}$ del laboreo convencional. En la campaña 2004-05, el no laboreo influyó positivamente sobre el área radicular (Tabla X, figura 4.27), con diferencias significativas en los perfiles 40-55 y 55-70 cm, y en la totalidad del

perfil (0-85 cm). La media de los dos años de estudio también estuvo influenciada por el sistema de laboreo, con diferencias significativas en el perfil 55-70 cm y 0-98 cm (Tabla X, figura 4.27). Existió una correspondencia con la densidad radicular obtenida en ambos años de estudio, lo que sugiere que el sistema radicular no experimentó cambios en el diámetro a medida que aumentó la profundidad.

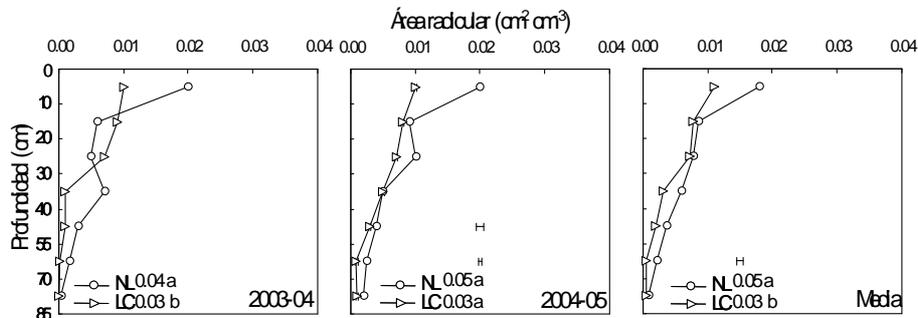


Figura 4.27. Efecto del sistema de laboreo en la área radicular de las habas en los años 2003-04 y 2004-05. En el interior de la figura se muestran los valores correspondientes a la totalidad del perfil (0-85 cm). NL: no laboreo; LC: laboreo convencional. Barras horizontales representan diferencias significativas ($P < 0.05$) por perfiles y letras diferentes representan diferencias significativas ($P < 0.05$) en el perfil completo (0-85cm).

La biomasa radicular de las habas varió significativamente con el año (Tabla XI) en el perfil 70-85 cm. En el año más húmedo los valores de biomasa radicular fueron 697 kg ha^{-1} y 413 kg de raíces por hectárea en para la totalidad del perfil (0-85 cm) en el no laboreo y laboreo convencional respectivamente (Figura 4.28). En el año 2004-05 no se observaron diferencias significativas entre los sistemas de laboreo, aunque mostró un patrón diferente de acumulación de biomasa radicular con respecto a 2003-04, aunque en el cómputo del perfil completo (0-85 cm) no existan diferencias significativas entre sistemas de laboreo. La biomasa radicular aumentó en el laboreo convencional con respecto al año anterior, aunque sin diferencias significativas (Tabla XI, figura 4.28) En ambos años de estudio, la mayor parte de la biomasa radicular se concentró en los primeros 40 cm de suelo. Según Hebblethwaite, (1982), Gregory, (1988), Husain *et al.* (1990) y Manschadi *et al.* (1998) el sistema radicular de las habas se caracteriza por ser bastante superficial, con profundidades máximas comprendidas entre los 50 y 90 cm dependiendo del genotipo, aporte de agua y propiedades físicas del suelo. Por tanto, un incremento en

la profundidad de la raíz como respuesta a condiciones de estrés hídrico ocurrirá sólo cuando en los perfiles profundos del suelo exista humedad suficiente como para permitir la penetración de la raíz.

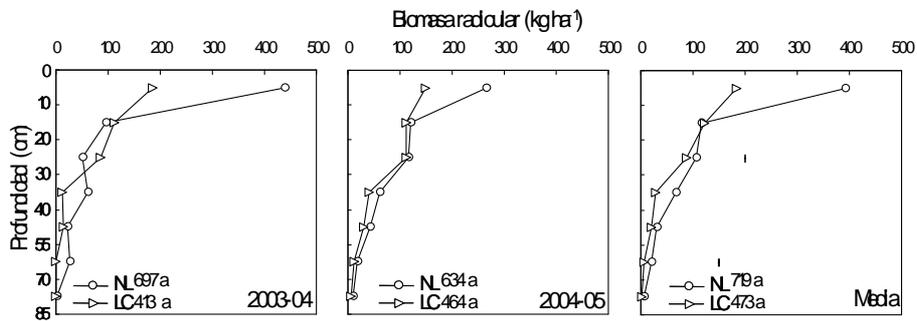


Figura 4.28. Efecto del sistema de laboreo en la biomasa radicular de las habas en los años 2003-04 y 2004-05. En el interior de la figura se muestran los valores correspondientes a la totalidad del perfil (0-85 cm). NL: no laboreo; LC: laboreo convencional. Barras horizontales representan diferencias significativas ($P<0.05$) por perfiles y letras diferentes representan diferencias significativas ($P<0.05$) en el perfil completo (0-85cm).

El N radicular de las habas estuvo afectado por el año (Tabla XII). El sistema de laboreo no influyó significativamente en la cantidad de N aportado por las raíces en el año 2003-04 (Figura 4.29), aunque el no laboreo tendió a suministrar más N en la totalidad del perfil ($24.4 \text{ kg N ha}^{-1}$ y $14.8 \text{ kg N ha}^{-1}$ en no laboreo y laboreo convencional respectivamente). Se encontraron diferencias en la concentración de N en las raíces, que varió en los diferentes perfiles en ambos años (Tabla XXI). En el año más seco el no laboreo favoreció el aporte de N en el perfil 30-40 cm. La cantidad de N aportado en la totalidad del perfil disminuyó en ambos sistemas de laboreo respecto del año anterior (Figura 4.29). Las variaciones en la biomasa radicular no explican el descenso registrado en dicho aporte, por lo que las menores precipitaciones redujeron la concentración de N en las raíces.

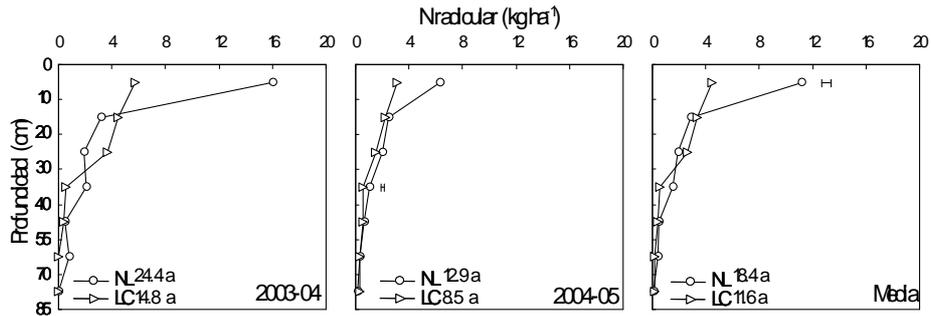


Figura 4.29. Efecto del sistema de laboreo en el N radicular de las habas en los años 2003-04 y 2004-05. En el interior de la figura se muestran los valores correspondientes a la totalidad del perfil (0-85 cm). NL: no laboreo; LC: laboreo convencional. Barras horizontales representan diferencias significativas ($P < 0.05$) por perfiles y letras diferentes representan diferencias significativas ($P < 0.05$) en el perfil completo (0-85cm).

4.5.2.2 MINIRHIZOTRON

La longitud radicular de las habas estuvo influenciada por el sistema de laboreo (Tabla XXXIII, figura 4.30). El laboreo convencional fue superior en el perfil 65-81 cm cuando el cultivo se encontraba en madurez fisiológica. Esta tendencia no se mantuvo a lo largo de todo el cultivo, aunque no se encontraron diferencias significativas en el resto de los perfiles. Los resultados obtenidos mediante este sistema y la extracción manual difirieron para los perfiles 10-20 cm y 20-30 cm. Según Manschadi *et al.* (1998), las raíces de las habas poseen un singular desarrollo en los primeros 30 cm de suelo, donde una fuerte raíz principal de gran diámetro ($> 0.5\text{mm}$) representa el principal aporte a la biomasa, mientras que un denso sistema de raíces finas ($< 0.5\text{mm}$ de diámetro) contribuye principalmente a la longitud radicular. Dado que los tamices empleados en la extracción manual no fueron inferiores a 0.5 mm, la mayor parte de las raíces finas no fueron detectadas por ese método y si mediante las observaciones del minirhizotron, explicando las diferencias de densidad radicular registradas. En concordancia con los resultados obtenidos por Manschadi *et al.* (1998), el sistema radicular continuó creciendo una vez superada la floración del cultivo, exceptuando el perfil 0-16 cm (Figura 4.30). La desecación del perfil más superficial a medida que avanzó el cultivo provocó un descenso en la longitud radicular a partir de floración.

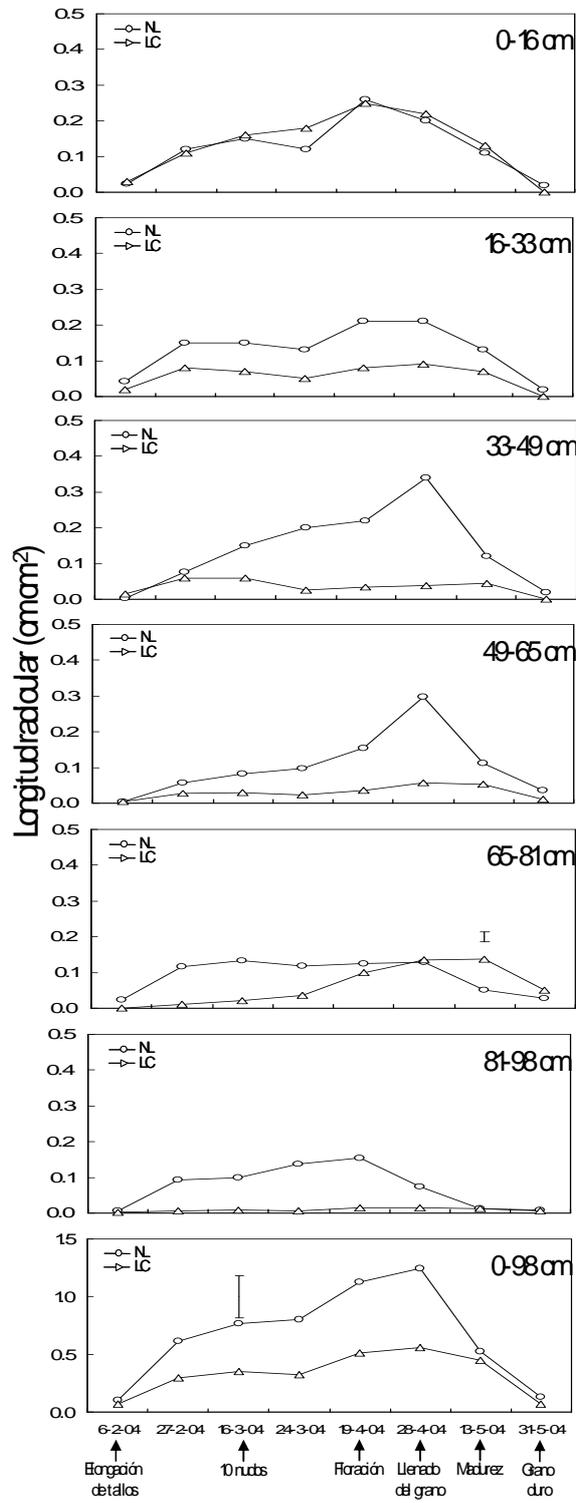


Figura 4.30 Efecto del sistema de laboreo en la longitud radicular de las habas en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo convencional)

El sistema de laboreo no influyó de manera significativa en la profundidad máxima alcanzada por las raíces, pero en el perfil 81-98 cm del no laboreo se observaron raíces prácticamente cuando el cultivo se encontraba en las primeras fases de crecimiento vegetativo. La longitud radicular del perfil completo (0-98 cm) también estuvo influenciada por el sistema de laboreo, alcanzando valores significativamente superiores en no laboreo en el estado de 10 hojas y manteniendo una tendencia similar (no significativa hasta el final del cultivo).

La superficie radicular proyectada (Figura 4.31) estuvo afectada por el sistema de laboreo en los perfiles 49-65 cm y 65-81cm (TablaXXXIV). El no laboreo favoreció significativamente el incremento de la superficie radicular en los perfiles indicados. Existió una correspondencia clara de este parámetro con la longitud radicular. La superficie radicular proyectada de la totalidad del perfil (0-98 cm) fue influenciada por el sistema de laboreo cuando el cultivo se encontró en la fase de 10 nudos visibles hasta la floración del mismo. La superficie radicular proyectada del perfil completo alcanzó valores máximos en no laboreo entorno $0.1 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$ hasta el estado de grano duro (Figura 4.31).

La superficie radicular total (Figura 4.32) estuvo influenciada por el sistema de laboreo en los mismos perfiles y estados fenológicos del cultivo que la superficie proyectada. La superficie radicular total del perfil completo (0-98 cm) también estuvo influenciada por el sistema de laboreo, coincidiendo con la longitud radicular observada en el mismo perfil. Los máximos valores fueron alcanzados por el no laboreo en el llenado del grano, con valores entorno a $0.3 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$. En el laboreo convencional, los mayores valores de superficie se alcanzaron entre el llenado del grano y madurez fisiológica, con valores próximos a $0.1 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$.

El diámetro radicular estuvo influenciado de forma significativa por el sistema de laboreo (Tabla XXXVI, figura 4.33), presentando diferencias significativamente superiores en no laboreo para los perfiles 16-33 cm, 33-49 cm y 65-81 cm.

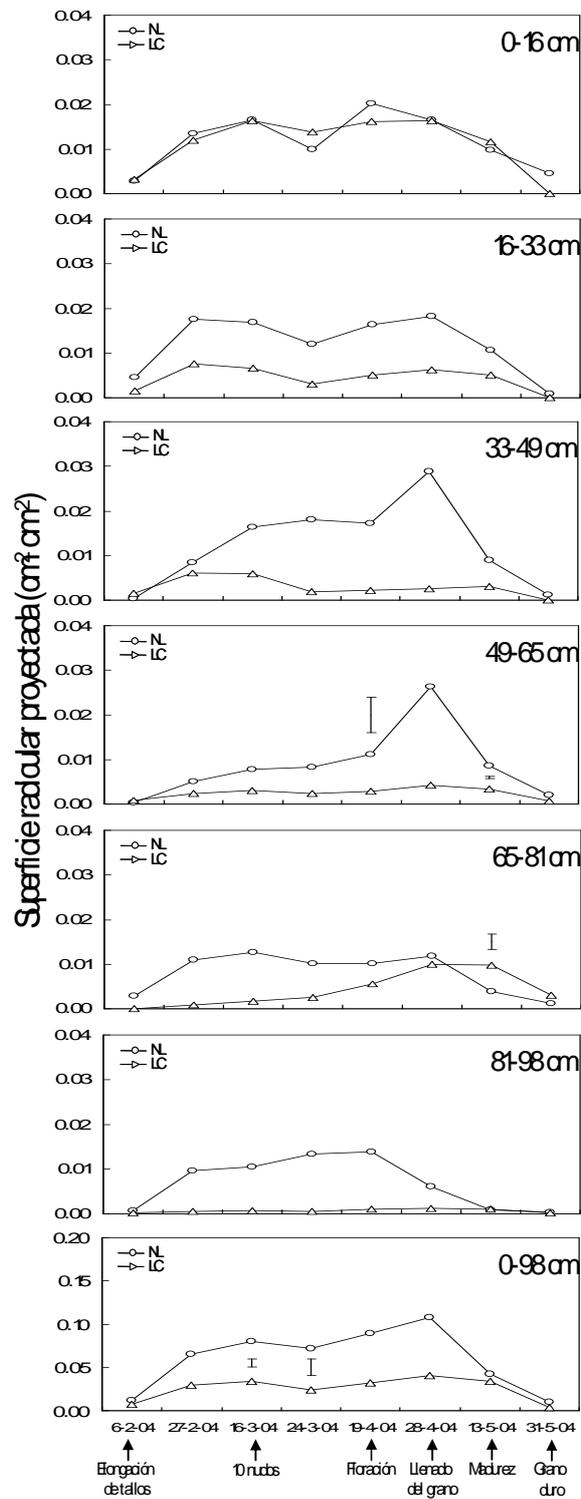


Figura 4.31. Efecto del sistema de laboreo en la superficie radicular proyectada de las habas en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo)

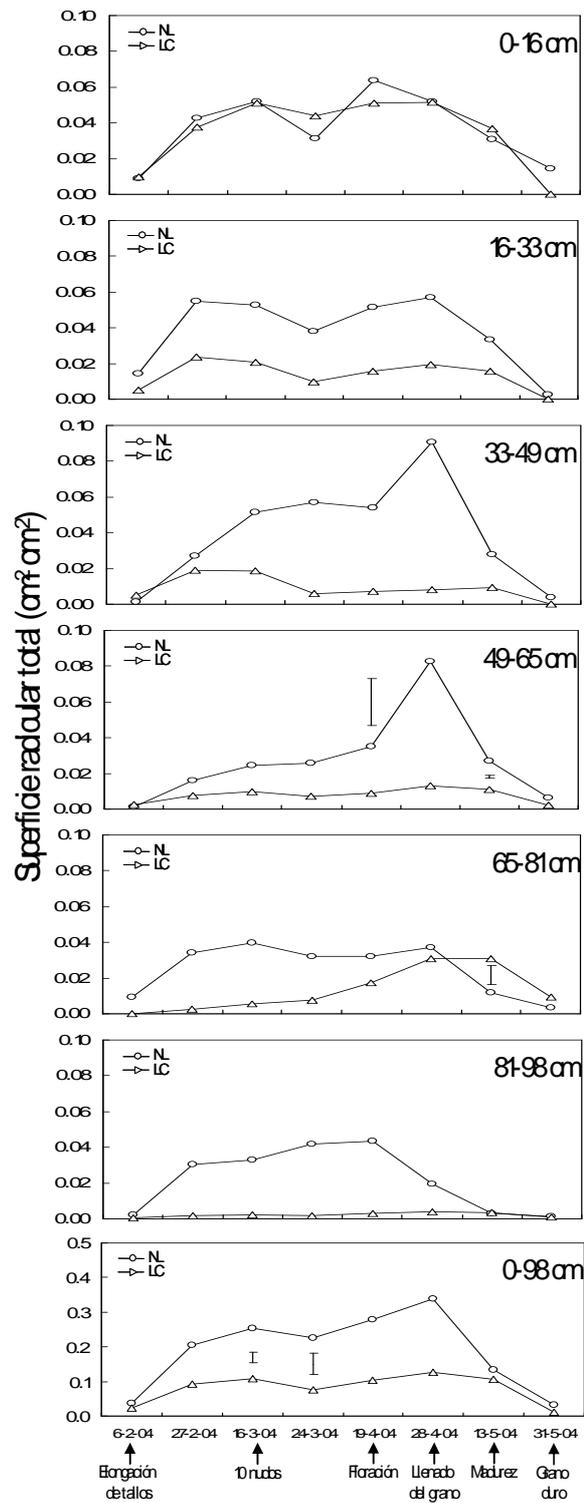


Figura 4.32. Efecto del sistema de laboreo en la superficie radicular total de las habas en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo convencional)

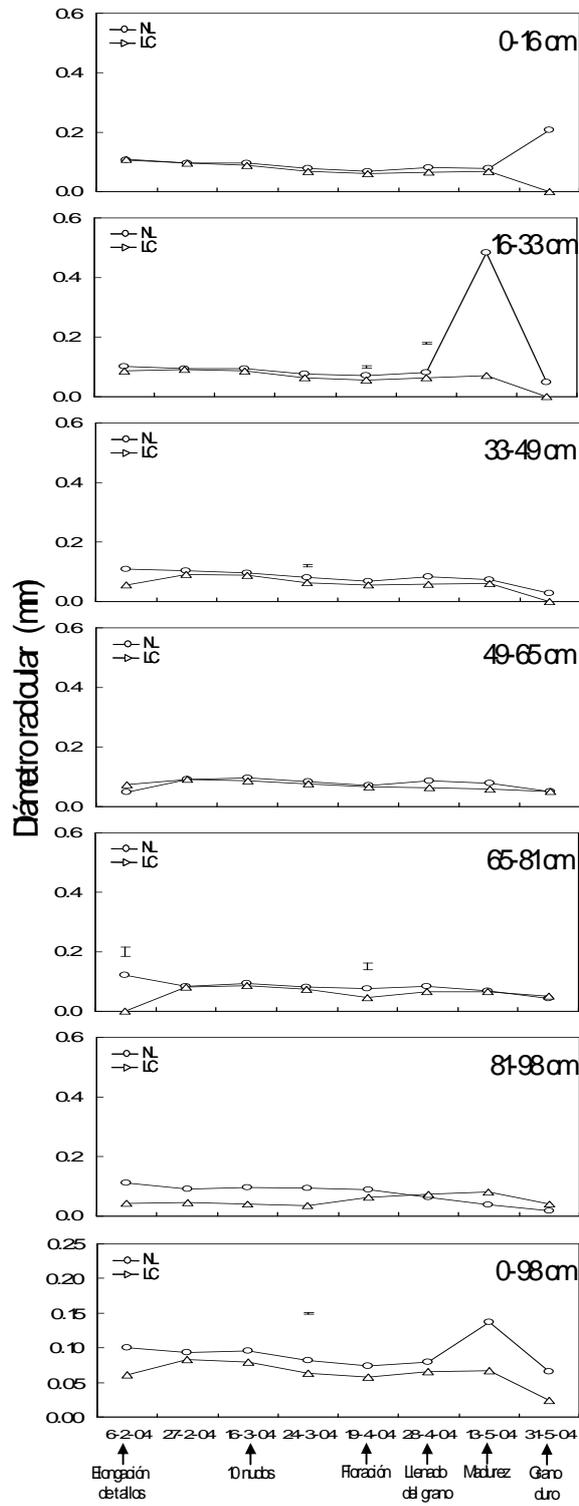


Figura 4.33. Efecto del sistema de laboreo en el diámetro radicular de las habas en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo convencional)

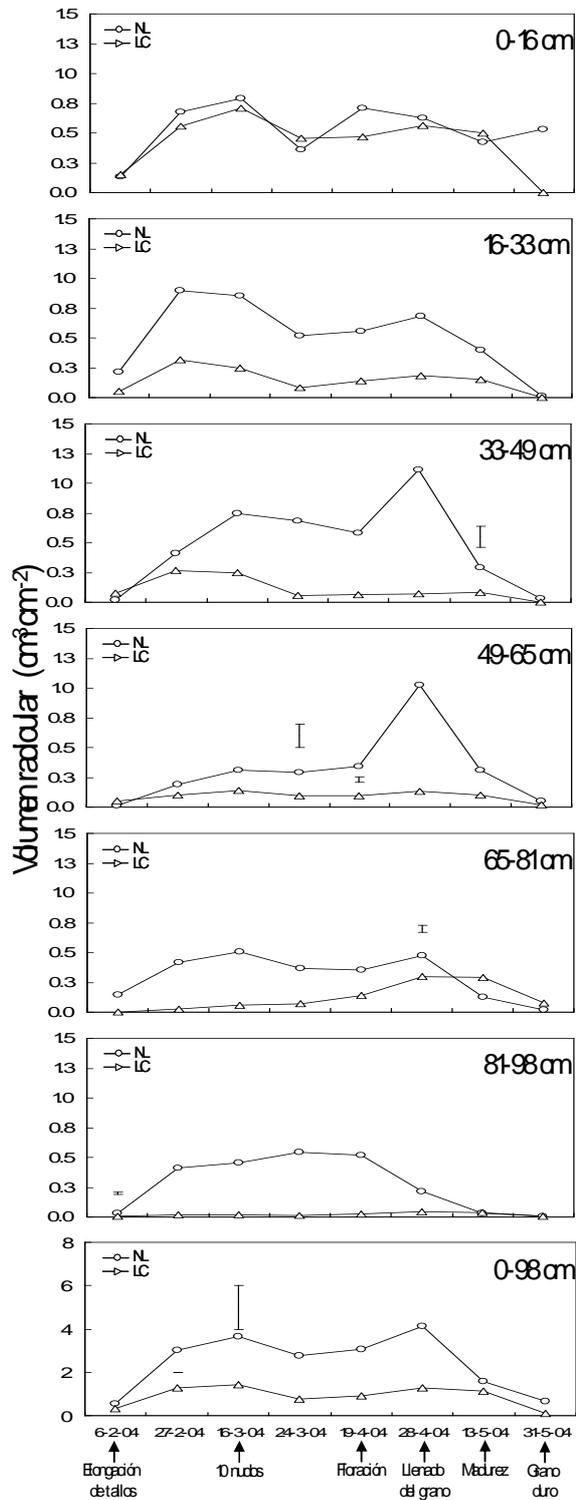


Figura 4.34. Efecto del sistema de laboreo en el volumen radicular de las habas en el año 2003-04. Las barras verticales indican la existencia de diferencias significativas con $P < 0.05$. (NL= No laboreo; LC= Laboreo convencional)

La tendencia a un mayor engrosamiento de las raíces en el no laboreo no favorece la relación capacidad de absorción –carbono empleado en la formación de raíces (Fitter, 1991, 1996; Yanai *et al.*, 1995), aunque incrementa la vida media de la raíz. El diámetro radicular medio a lo largo del perfil (0-98 cm) fue similar para los dos sistemas de laboreo, y constante a lo largo de la estación de crecimiento del cultivo, aunque las raíces tendieran al engrosamiento en no laboreo en la madurez fisiológica. El 90 % de las raíces tuvieron un diámetro medio comprendido entre los 0.05 y 0.1 mm.

El volumen radicular de las habas (Figura 4.34) presentó diferencias significativas debido al sistema de laboreo en los perfiles más profundos (49 a 98 cm). El volumen de raíces fue superior en el no laboreo en todos los perfiles mencionados. El volumen de raíces estuvo repartido a lo largo del perfil suelo en no laboreo, mientras que en laboreo convencional, se concentró en los perfiles más superficiales. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Manschadi *et al.* (1998) para el laboreo convencional. Cuando se estudió la totalidad del perfil (0-98 cm) el volumen de raíces presentó diferencias significativas entre sistemas de laboreo, superior en no laboreo en las etapas iniciales del cultivo con valores máximos entorno a $4 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$ y $2 \text{ cm}^2 \text{ cm}^{-2}$ en no laboreo y laboreo convencional respectivamente

Se realizó una correlación (no mostrada) entre la densidad y área radicular del girasol en floración obtenidas mediante la extracción manual y la densidad radicular equivalente y superficie radicular proyectada obtenida mediante las observaciones de a través del minirizotron y transformadas según la ecuación de Merrill y Upchurch (1994). A pesar de los elevados coeficientes de variación se encontró correlación significativa para la densidad radicular ($r = 0.43^*$; $n = 24$), pero no para el área radicular ($r = 0.35$; $n = 24$).

4.5.3 APOORTE DE N AL SISTEMA

4.5.3.1 FIJACIÓN DE N₂

El método de la abundancia natural (AN) fue el único que permitió la obtención de datos acerca del porcentaje de N derivado de la fijación atmosférica de N₂ (NDA) en ambos años de estudio, ya que en la campaña 2004-05 no se pudo realizar la estimación mediante el método del enriquecimiento con ¹⁵N (DI: dilución isotópica de ¹⁵N). La media total de ambos años de NDA estimada por este método fue 69.6 % (Tabla 4.6). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Schwenke *et al.* (1998), pero difieren de los aportados por López-Bellido *et al.* (2006) en un estudio sobre el mismo experimento, quien obtuvo un valor de 88.8 %. Estas diferencias en el NDA se debieron aparentemente a la diferencia de precipitaciones registradas entre los años de estudio.

En el año donde se aplicaron ambos métodos no existieron diferencias significativas entre ellos en la estimación del NDA, con 68,7 % y 91.4 % de NDA estimados según la AN y DI respectivamente (Tabla 4.6) (MDS 0.05 = 32.9), en concordancia con los resultados obtenidos por López-Bellido *et al.* (2006) y Mayer *et al.* (2003) acuerdo con Unkovich y Pate (2000), estas diferencias entre los porcentajes de NDA se encuentran dentro del rango de fiabilidad que existe entre ambos métodos. Los valores de NDA estimados mediante AN no difirieron significativamente entre ambos años de estudio (Tabla 4.6). El sistema de laboreo tampoco influyó en el NDA en ninguno de los años estudiados. Según Carranca *et al.* (1999) la fijación de N₂ se encuentra fuertemente influenciada por el contenido de agua del suelo, sin embargo, los datos obtenidos muestran incluso con diferencias de 461 mm de lluvia entre años, los niveles de fijación no experimentan cambios significativos. El sistema de laboreo no indujo diferencias significativas en el NDA estimado por ambos métodos. Sin embargo, si influyó en la cantidad de N₂ fijado (kg N ha⁻¹) obtenida mediante la DI (Tabla 4.6). El N₂ fijado en no laboreo fue superior frente al laboreo convencional (77.7 kg N ha⁻¹ y 41.2 kg N ha⁻¹ en no laboreo y laboreo convencional respectivamente).

Tabla 4.6. Efecto del año y sistema de laboreo en la estimación de la fijación de N₂ por las habas mediante el método de la abundancia natural de ¹⁵N y del enriquecimiento en ¹⁵N.

Año	Sistema de Laboreo	Abundancia natural ¹⁵ N				Enriquecimiento ¹⁵ N			
		NDA (%)	N ₂ Fijado (kg ha ⁻¹)	NDS (kg ha ⁻¹)	N Aportado (kg ha ⁻¹)	NDA (%)	N ₂ Fijado (kg ha ⁻¹)	NDS (kg ha ⁻¹)	N Aportado (kg ha ⁻¹)
2003-04	No laboreo	55.8 a	40.5 a	36.8 a	- 34.7 a	92.1 a	77.7 a	6.7 a	- 4.3 a
	Laboreo	81.7 a	31.2 a	9.2 a	- 66 a	90.8 a	41.2 b	3.5 a	- 1.7 b
	Media	68.7 A	35.8 A	23 A	-20.6 A	91.4 A	59.5 A	5.1 A	-3 A
2004-05 ²	No laboreo	68.3a	8.3	3.8	- 0.8				
	Laboreo ¹	67.3a							
	Media	68.1							
Análisis conjunto	No laboreo	62 a							
	Laboreo	77.7 a							
	Media	69.9							

¹ No existió cosecha en las parcelas de Laboreo convencional.

² No se aplica ¹⁵N para el método de enriquecimiento con ¹⁵N.

³ N derivado del aire

⁴ N derivado del suelo

Letras minúsculas diferentes indican la existencia de diferencias significativas (P<0.05) entre sistemas de laboreo, y mayúsculas indican diferencias significativas (P<0.05) entre métodos de estimación.

Según Kessel y Hartley (2000), Reiter *et al.* (2002) y Souza *et al.* (2003), el no laboreo incrementa la cantidad de N_2 fijado por las leguminosas. Cuando el laboreo se reduce, se observan menores tasas de mineralización y nitrificación, además de un incremento en la inmovilización del N y desnitrificación, que conlleva un descenso en el N disponible (Doran *et al.*, 1980). Según Kessel y Hartley (2000) esta disminución del N disponible estimula la demanda de N y un aumento de la fijación de N_2 , al menos hasta que se alcanza un nuevo equilibrio entre el aporte de residuos y la tasa de descomposición. Los valores medios de fijación de N_2 obtenidos usando ambos métodos de estimación (los cuales aportaron similares resultados para las condiciones aquí estudiadas) fueron 80% de NDA y $47.6 \text{ kg N ha}^{-1}$ fijadas por las habas. Kessel y Hartley (2000) y Turpin *et al.* (2002) obtuvieron valores medios de NDA comprendidos entre 79% y 85%, similares a los aquí obtenidos. Carranca *et al.* (1999) obtuvo similares valores de N_2 en condiciones de secano Mediterráneas. Los valores medios de NDA y N_2 fijado (kg N ha^{-1}) obtenidos coincidieron con los resultados aportados por López-Bellido *et al.* (2006).

La contribución de las habas al N del suelo medido como balance de N resultó negativa para ambos métodos de estimación (Tabla 4.6). La máxima contribución a este “pool” ocurre cuando la leguminosa es 100% dependiente de la fijación simbiótica para su crecimiento, donde el N presente en el suelo no es prácticamente utilizado por la planta (Evans *et al.*, 1989). Los valores medios obtenidos fueron $-20.6 \text{ kg N ha}^{-1}$ y -3 kg N ha^{-1} según la estimación de AN y DI respectivamente, similares a los obtenidos por Carranca *et al.* (1999), e inferiores a los aportados por López-Bellido *et al.* (2006). Las diferencias entre los sistemas de laboreo sólo fueron significativas en la estimación mediante DI, donde el cultivo en laboreo convencional produjo un mayor aporte de N al suelo. Según Carranca *et al.* (1999) la mayor extracción de N que se detecta en no laboreo se encuentra relacionada con un mayor rendimiento de grano.

4.5.3.2 RIZODEPOSICIÓN DE N

La proporción de N en el suelo derivado de la rizodeposición (PN_{dr}) no difirió significativamente entre sistemas de laboreo (Tabla XXVI, figura 4.35). Si se encontraron diferencias significativas entre la PN_{dr} en los primeros 30 cm y el resto de perfiles. En el laboreo convencional, el 4 % del N del suelo en los primeros 30 cm fue derivado de la rizodeposición, sin diferencias significativas en la PN_{dr} observada en no laboreo (5 %).

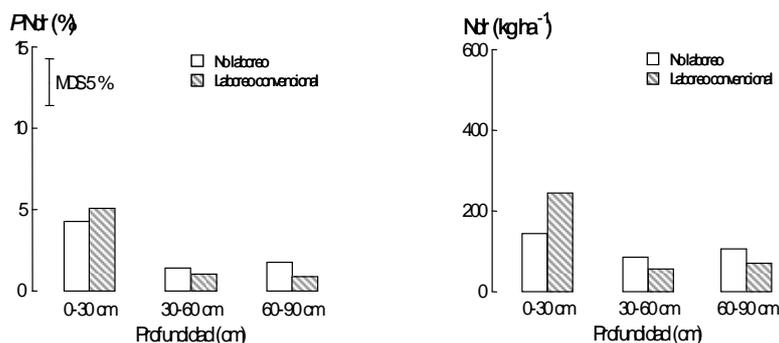


Figura 4.35. Interacción sistema de laboreo x profundidad del porcentaje de N derivado de la rizodeposición (PN_{dr}) y la cantidad de N aportado por la rizodeposición (N_{dr}) en las habas.

Estos resultados difieren de los reportados por Mayer *et al.* (2003) que estimó en condiciones de laboratorio que el porcentaje de N mineral procedente de la rizodeposición de las habas entorno al 43%. Según Mayer *et al.* (2003) la mineralización de los rizodepósitos de habas es muy alta, y la cantidad de N mineral proveniente de esta fuente en cosecha es muy bajo, lo que indica que la mayor parte del N proveniente de la rizodeposición es inmovilizado por los microorganismos del suelo o incorporado en la materia orgánica del suelo. La cantidad media total de N depositado en el suelo procedente de la rizodeposición en el periodo comprendido desde la floración del cultivo hasta la senescencia fue de $118\ kg\ N\ ha^{-1}$ considerando la totalidad del perfil (0-90 cm). Estos resultados difieren de los aportados en condiciones de campo por Beck *et al.* (1991) y Schmidtke, (1996). El sistema de laboreo no influyó en la cantidad de N aportado por la rizodeposición, obteniendo

cantidades medias de 124 kg N ha⁻¹ y 111 kg N ha⁻¹ en laboreo convencional y no laboreo respectivamente.

La rizodeposición de N tampoco fue significativamente distinta entre los perfiles de suelo estudiados. El 42 % del N depositado se encontró en los primeros 30 cm. El resto de los perfiles aportaron el 32 % y 26 % del N restante (30-60 cm y 60-90 cm respectivamente). La interacción sistema de laboreo x perfil no fue significativa. Los 30 primeros cm del no laboreo fueron donde se registró la mayor cantidad de N rizodepositado, aportando 244 kg N ha⁻¹.

En un trabajo realizado por Mayer *et al.* (2003) estimaron que la proporción de N que era aportado como N residual (contenido en tallos, hojas, raíces y rizodeposición) representaba el 39 % del N total de la planta. Dentro del conjunto de aportes de N residual, la rizodeposición representaba casi el 50 % del aporte, suponiendo el 13.4 % del N total presente en la planta. Relacionando el balance negativo de N al suelo derivado de los restos orgánicos y el aporte de N proveniente de la rizodeposición es posible explicar las diferencias en el rendimiento y la calidad del trigo en rotación con habas reportadas por López-Bellido *et al.* (2000)

5. CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES

El sistema de laboreo no influye significativamente en la biomasa radicular media del trigo, girasol, habas y garbanzos, aunque el no laboreo tiende a incrementar dichos parámetros cuando el año es seco. Para este parámetro se alcanzaron unos valores promedios de 1163, 1162, 549 y 404 kg ha⁻¹ de raíces respectivamente. El no laboreo aumenta la densidad radicular de las habas mientras que en garbanzo dicho índice mejora con el laboreo convencional y no existen diferencias en la densidad radicular del trigo y girasol.

En el año más lluvioso el 80% de las raíces de los cuatro cultivos se localizan en los primeros 40 cm, incrementándose la densidad radicular entre los 40 y 70 cm de profundidad en el año más seco. El no laboreo induce precocidad en el establecimiento del sistema radicular en todos los cultivos estudiados. Mientras que el crecimiento radicular de trigo y girasol se detiene en antesis, las raíces de las leguminosas continúan creciendo hasta el llenado del grano.

La determinación de la biomasa y densidad radicular mediante el método de extracción manual de raíces conlleva una subestimación de los valores de tales parámetros, debido a que más del 85% del sistema radicular lo forman raíces de diámetros inferiores a 0.1 mm. Por ello, y teniendo en cuenta los elevados coeficientes de variación que caracterizan a estas mediciones, no existe correlación significativa entre los resultados obtenidos mediante el método de extracción manual de raíces y los datos resultantes de las observaciones realizadas con el sistema minirhizotróf.

A pesar de la disparidad de datos originados por años tan distintos climáticamente, no existen diferencias significativas en los resultados de la fijación de N₂ por las habas estimada por el método de la abundancia natural de ¹⁵N y el enriquecimiento de ¹⁵N. No obstante si aparecen diferencias significativas en la fijación de N₂ por el garbanzo en función del método de estimación empleado. La extracción de N por el grano ha resultado mayor que el aporte de N al suelo realizado por la planta a pesar de que la fijación simbiótica ha representado el 83% de la fuente

Conclusiones

de N en los garbanzos y el 91 % en las habas durante la estación de crecimiento. La cantidad de N total aportado al suelo mediante la rizodeposición de habas y garbanzos no ha estado influenciada por el sistema de laboreo, aportando 118 y 189 kg N ha⁻¹ respectivamente.

6. REFERENCIAS

REFERENCIAS

- Analytical Software. (2001). Statistix 7.0. Tallahassee, F.L.
- Barracough, D. 1995. ^{15}N isotope dilution techniques to study soil nitrogen transformations and plant uptake. *Fertilizer Res.* 42, 185-192.
- Beare, M.H., Cabrera, M.; Hendrix, P. y Coleman, D. 1994. Agrégate-protected and unprotected organic matter pools in convencional tillage and no tillage soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 787-795.
- Beck, D.P., Wery, J., Saxena, M.C. y Ayadi, A. 1991. Dinitrogen fixation and nitrogen balance in cool season food legumes. *Agron.J.* 83, 334-341.
- Bengough, A.G. y Mullins, C. 1990. Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.* 41, 341-358.
- Benjamin, J.G. y Nielsen, D.C. 2006. Water deficit effects on root distribution of soybean, field pea and chickpea. *Field Crops Res.* 97, 248-253.
- Black, K.E., Habron, C.G., Franklin, M., Atkinson, D. y Hooker, J.E. 1998. Differences in root longevity of some tree species. *Tree Physiol.* 18, 259-264.
- Black, A.L. y Tanaka, D.L. 1996. A conservation tillage-cropping systems study. Northern Great Plains. In: E.A. Paul *et al.* (Eds) *Proc. Soil organic matter, agroecosystems, carbon pools and dynamics proyect.* Lewis Publ., Ann Arbor, MI.
- Blamey, F.P.C., Zollinger, R.K., Schneiter, A.A. 1997. Sunflower production and culture. In: *Sunflower technology and production.* Schneiter, A.A. (Eds) *Am. Soc. Agron.* Madison, WI. pp. 595-670.
- Blevins, R.L. y Frye, W.W. 1993. Conservation tillage: an ecological approach to soil management. *Adv. Agron.* 51, 33-78.

Referencias

- Blevins, R.L. 1986. Idoneidad del suelo para el laboreo nulo. En: "Agricultura sin laboreo. Principios y aplicaciones" (Eds. R.E. Phillips y S.H. Phillips). Ediciones Bellaterra. Barcelona. pp. 44-68.
- Böhm, W. 1979. Methods for studying root systems. *Ecological Studies* 33, 188. Springer, NY.
- Bonari, E., Mazzoncini, M. y Caliendo, A. 1994 Cropping and farming systems in Mediterranean areas. In: Borin, M., Sattin, M. (Eds) *Proceedings of the Third European Society of Agronomy Congress, Abano-Padova, 1994*. pp 636-644.
- Bottner, P., Pansu, M. y Sallih, Z. 1999. Modelling the effect of active roots on soil organic matter turnover. *Plant Soil* 216, 15-25.
- Brown, D.A. y Upchurch, D.R. 1987. Minirhizotrons: a summary of methods and instruments in current use. En: *Minirhizotron observation tubes: Methods and applications for measuring rhizosphere dynamics*(Ed: H.M. Taylor). ASA Special Publication n° 50. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp 15-30.
- Buddenhagen, I.W. 1990. Legumes in farming systems in Mediterranean climates. En "The role of legumes in farming systems of the Mediterranean areas" (Eds. A.E. Osman, M.H. Ibrahim y M.A. Jones). Kluwer Academic Publishers. ICARDA. The Netherlands, pp.3-29.
- Caldwell, M.M., Dudley, L.M. y Lilieholm, B. 1992. Soil solution phosphate, root uptake kinetics and nutrient acquisition: implications for a patchy soil environment. *Oecologia* 89, 305-309.
- Caranca, C., Varennes, A. y Rolston, D. 1999. Biological nitrogen fixation by faba bean, pea and chickpea, under field conditions, estimated by the ¹⁵N isotope dilution technique. *Eur. J. Agron.* 10, 49-56.
- Cheng, W. 1999. Rhizosphere feedbacks in elevated CO₂. *Tree Physiol.* 19, 313-320.

- Chen, W., Coleman, D.C., Carroll, C.R. y Hoffman, C.A. 1993. In situ measurement of root respiration and soluble carbon concentrations in the rhizosphere. *Soil Biol. Biochem.* 25, 1189-1196.
- Cheng, W y Kuzyakov, Y. 2005. Root effects on soil organic matter decomposition. En "Root and Soil Management: Interactions between roots and the soil". (Eds. R.W.Zobel y S.F. Wright). Am. Soc. Agrom. Wisconsin, USA. pp. 119-144.
- CID, Inc. 2002. CI-400 CIAS. Ver 2.0. Camas, WA 98607, USA.
- Conway, K.E. 1996. An overview of the influence of sustainable agricultural systems on plant diseases. *Crop Protection.* 15, 223-227
- Coulombe, C.E., Wilding, L.P. y Dixon, J.B. 1996. Overview of Vertisols: characteristics and impacts on society. *Adv. Agron.* 57, 289-375.
- Costa, C.; Dwyer, L.M.; Hamel, C.; Muamba, D.F.; Wang, X.L.; Nantais, L. y Smith, D.L. 2001. Root contrast enhancement for measurement with optical scanner-based image analysis. *Canadian Journal of Botany* 79, 23-29.
- Curl, E.A. y Truelove, B. 1986. *The Rhizosphere*. Springer, Berlin. pp.288.
- Dalal, R.C., Strong, W.M., Doughton, J.A., Weston, E.J., Mcnamara, G.T. y Cooper, J.E. 1997. Sustaining productivity of a Vertisol of Warra Queensland with fertilizers, no-tillage for legumes. 4. Nitrogen fixation, water use and yield of chickpea. *Aus. J. Exp. Agric.* 37, 667-676.
- Danson, S.K. 1988. The use of ^{15}N enriched fertilizers for estimating nitrogen fixation in grain and pasture legumes. En: (Eds: D.P. Beck y L. Materon) *Nitrogen fixation by Legumes in Mediterranean Agriculture*. ICARDA, Alepo Syria, pp. 345-358.

Referencias

- Danson, S.K.; Hardanson, G. y Zapata, F. 1993. Misconceptions and practical problems in the use of ^{15}N enrichment techniques for estimating N_2 fixation. *Plant and Soil* 152, 25-52.
- De Neergaard, A. y Magid, J. 2001. Influence of the rhizosphere on microbial biomass and recently formed organic matter. *Eur. J. Soil Sci.* 52, 377-384.
- Dexter, A.R. y Hewitt, J.S. 1978. The deflections of plants roots. *J. Agric. Eng. Res.* 23, 17-22.
- Dittmer, H.J. 1937. A cuantitative study of the roots and root hairs of a winter rye plant (*Secale cereale*). *American Journal of Botany* 24, 417-420.
- Doran, J.W. 1980. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 765-771.
- Doughton, J.A., Saffigna, P.G., Vallis, I. y Mayer, R.J. 1995. Nitrogen fixation in chickpea II. Comparison of ^{15}N enrichment and ^{15}N natural abundance methods for estimating nitrogen fixation. *Aus. J. Agric. Res.* 46, 225-236.
- Dubach, M. y Russelle, M.P. 1995. Reducing the cost of estimating root turnover with horizontally installed minirhizotrons. *Agron. J.* 89, 258-263.
- Eissenstat, D.M. y Yanai, R.D., 1997. The ecology of root lifespan. *Adv. Ecol. Res.* 27, 1-60.
- Elliot, L.F. y Stott, D.E. 1997. Influence of no till cropping systems on microbial relationships. *Adv. Agron.* 60, 121-147.
- Elliot, E.T. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 627-633.

- Evans, J., O'Connor, G.E., Turner, G.L., Coventry, D.R., Fettell, N., Mahoney, J., Armstrong, E.L. y Walscott, D.N. 1989. N₂ fixation and its value to soil N increase in lupin, field pea, and other legume in South eastern Australia. *Aus. J. Agric. Res.* 40, 791-805.
- Fitter, A.H. 1985. Functional significance of root morphology and root system architecture. En: *Ecological interactions in soil* (Ed: A.H. Fitter *et al.*). Blackwell, London.
- Fitter, A.H. 1991. The ecological significance of root system architecture: an economic approach. In *Plant Root Growth: an Ecological Perspective*. Blackwell Scientific Publishers, London. pp 229-243.
- Fitter, A.H. 1996. Characteristics and functions of root systems. In : *Plant Roots, the Hidden Half*. Waisel, Y. y Eshel, A. (Eds) Marcel Dekker, New York . pp 1-20.
- Fuentes, J.L. 1989. El suelo y los fertilizantes. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Servicio de Extensión Agraria. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Gathumbi, S.M. 2004. Root recovery of five tropical tree and shrub species by sieves of different mesh sizes. *Agroforestry Systems*, 60, 233-237.
- Gerard, C.J., Sexton, P. y Shaw, G. 1982. Physical factors influencing soil strength and root growth. *Agron. J.* 74, 875-879.
- Germon, J.C. y Taureau, J.C. 1991. Simplification du travail du sol et transformations de l'azote. *Perspectives Agricoles*. 162, 40-51.
- Giráldez, J.V., González, P. y 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.

Referencias

- Gómez, K.A. y Gómez, A.A. (1984). Statistical procedures for Agricultural Research. Wiley, New York.
- Goss, M.J. 1977. Effects of mechanical impedance on root growth in barley (*Hordeum vulgare* L) I. Effects on the elongation and branching of seminal root axes. J. Exp. Bot. 28, 96-111.
- Goss, M.J. 1991. Consequences of the effects of roots on soil. En "Plant root growth" (Ed. D Atkinson). Blackwell Scientific Publ., Oxford, England.
- Goss, M.J. y Russell, R.S. 1980. Effects of mechanical impedance on roots growth in barley (*Hordeum vulgare* L.) III. Mechanism of the response of roots to mechanical stress. J. Exp. Bot. 31, 577-588.
- Goss, M.J. y Kay, B.D. 2005. Soil Aggregation. En "Root and Soil Management: Interactions between roots and the soil". (Eds. R.W.Zobel y S.F. Wright). Am. Soc. Agrom. Wisconsin, USA. pp. 163-180.
- Gowing, D.J., Davies, W. y Jones, H. 1990. A positive root-sourced signal as an indicator of soil drying in apple (*Malus x domestica* B.). J. Exp. Bot. 28, 415-426.
- Gregory, P.J. 1988. Root growth of chickpea, faba bean, lentil and pea and effects of water and salt stress. En: Summerfield, R.J. (Ed), World Crops: Cool Season Food Legumes. Kluwer Academic, London, pp. 857-867.
- Halvorson, A.D. y Reule, C.A. 1994. Nitrogen fertilizer requirements in a annual dryland cropping system. Agron. J. 86, 315-318.
- Halvorson, A.D., Black, A.L., Krupinsky, J.M., Merrill, S.D. y Tanaka, D.L. 1999. Sunflower response to tillage and nitrogen fertilization under intensive cropping in a wheat rotation. Agron. J. 91, 637-642.

- Hammel, J.E. 1995. Long-term tillage and crop rotation effects a winter wheat production in Northern Idaho. *Agron. J.* 86, 315-318.
- Hagin, J. y Tucker, B. 1982. Fertilization of dryland and irrigated soils. Springer-Verlag. Berlin.
- Hatfield, Hatfield, J.L., Sauer, T.J. y Prueger, J.H. 2001. Managing soils to achieve greater water use efficiency. A review. *Agron. J.* 93, 271-280.
- Haynes, R.J. y Beare, M.H. 1997. Influence of six crop species on aggregate stability and some labile organic matter fractions. *Soil Biol. Biochem.* 29, 1647-1653.
- Hebbjethwaite, P. 1982. The effects of the water stress on the growth, development and yield of *Vicia faba* L. En: Hawtin, G. y Webb, C. (Eds). *Faba bean improvement*. Martinus Nijhoff, The Netherlands, pp. 165-175.
- Heeraman, D.A. y Juma, N.G. 1993. A comparison of minirizotron, core and monolithic methods for quantifying barley (*Hordeum vulgare* L.) and faba bean (*Vicia faba* L.) root distribution. *Plant Soil* 148, 29-41.
- Heichel, G.H. 1987. Legumes as a source of nitrogen in conservation tillage systems. En: "The role of legumes in conservation tillage systems" (Ed. J.F. Power). *Soil Conserv. Soc. A. Iowa*. pp. 29-34.
- Helal, H.M. y Sauerbeck, D.R. 1984. Influence of plant root on C and P metabolism in soil. *Plant Soil.* 76, 175-182.
- Helal, H.M. y Sauerbeck, D.R. 1986. Effect of plant roots on carbon metabolism of soil microbial biomass. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenkd.* 149, 181-188.
- Helal, H.M. y Sauerbeck, D.R. 1989. Carbon turnover in the rhizosphere. *Z Pflanz Bodenkunde* 152, 211-216.

Referencias

- Hendrick, R.L. y Pregitzer, K.S. 1993a. Patterns of fine root mortality in two sugar maple forest. *Nature* 361, 59-61.
- Hendrick, R.L. y Pregitzer, K.S. 1993b. The dynamics of fine roots length, biomasa and nitrogen content in two northern hardwood ecosystems. *Can. J. For. Res.* 23, 2507-2520.
- Hendricks, J.J., Hendrick, R.L., Wilson, C.A., Mitchell, R.J., Pecot, S.D. y Guo, D. 2006. Assessing the patterns and controls of fine root dynamics: an empirical test and methodological review. *Journal of Ecology*, 94, 40-57.
- Herridge, D.F. 1982. Crop rotation involving legumes. En "Nitrogen Fixation in Legumes" (Ed. J.M. Vicent). Academic Press. New York. pp. 253-261.
- Hesterman, O.B., Ruselle, M.P., Shaeffer, C.C. y Heichel, G.H. 1987. Nitrogen utilization from fertilizer and legumes residues in legume-corn rotations. *Agron. J.* 78, 19-23.
- Hodge, A. 2004. The plastic plant: root responses to heterogeneous supplies of nutrients. *New Phytol.* 162, 9-24.
- Hogh-Jensen, H.; Loges, R.; Jorgensen, F.V.; Vinther, F.P. y Jensen, E.S. 2004. An empirical model for quantification of symbiotic nitrogen fixation in grass-clover mixtures. *Agricultural Systems* 82, 181-194.
- Hogh-Jensen, H. y Schjoerring, J.K. 2001. Rhizodeposition of nitrogen by red clover, white clover and ryegrass leys. *Soil Biol. Biochem.* 33, 439-448.
- Hogh-Jensen, H. y Schjoerring, J.K. 1994. Measurement of biological dinitrogen fixation in grassland: Comparison of the enriched ^{15}N dilution and the ^{15}N natural abundance method at different nitrogen application rates and defoliation frequencies. *Plant Soil* 166, 153-163.

- Hood, R.C., Goran, K.N., Ainger, M. y Handerson, G. 1999. A comparison of direct and indirect ^{15}N techniques for estimating crop N uptake from organic residues. *Plant Soil* 208, 259-270.
- Hoogenboom, G., Huck, M.G. y Peterson, C.M. 1987. Root growth rate of soybean as affected by drought stress. *Agron. J.* 79, 607-614.
- Horton, R. Bristow, K.L., Kluitenberg, G.J. y Sauer, T.J. 1996. Crop residue effects on surface radiation and energy balance- Review. *Theor. Appl. Climatol.* 54, 27-37.
- Husain, M.M., Reid, J.B., Othman, H. y Gallagher, J.N. 1990. Growth and water use of faba beans (*Vicia faba*) in a sub-humid climate. I. Root and shoot adaptations to drought stress. *Field Crops Res.* 23, 1-17.
- Hütsch, B.W., Augustin, J. y Merbach, W. 2002. Plant rhizodeposition-an important source for carbon turnover soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 397-407.
- Ingham, R.E., Trofymow, E.R., Ingham, E.R. y Coleman, D. 1985. Interactions of bacteria, fungi and their nematode grazers: Effects on nutrient cycling and plant growth. *Ecol. Monogr.* 55, 119-140.
- ITCF.1995. Azote et interculture. *Perspectives Agricoles.* 206, I-LXIII.
- Janzen, H.H. 1990. Deposition of nitrogen into the rhizosphere by wheat roots. *Soil Biol. Biochem.* 22, 1155-1160.
- Janzen, H.H. y Bruinsma, Y. 1993. Rhizosphere N deposition by wheat under varies water stress. *Soil Biol. Biochem.* 25, 631-632.
- Jarvis, S.C., Stockdale, E.A., Shepherd, M.A. y Powlson, D.S. 1996. Nitrogen mineralization in temperate agricultural soils: processes and measurements. *Adv. Agron.* 57, 187-227.

Referencias

- Jackson, R.B., Schimel, J.P. y Firestone, M. 1989. Short-term partitioning of ammonium and nitrate between plants and microbes in an annual grassland. *Soil Biol. Biochem.* 21, 409-415.
- Jackson, R.B., Canadell, J., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Sala, O.E. y Schulze, E.D. 1996. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108, 349-411.
- Jackson, R.B., Mooney, H.A. y Schulze, E.D. 1997. A global budget of fine root biomass, surface area and nutrient contents. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 94, 7362-7366.
- Jenkinson, D.S. 1977. Studies on decomposition of plant material in soil. 5: effects on plant cover and soil type on loss of carbon from C-14 labeled ryegrass decomposing under field conditions. *J. Soil Sci.* 28, 424-434.
- Jensen, E.S. 1996. Rhizodeposition of N by pea and barley and its effects on soil dynamics. *Soil Biol. Biochem.* 28, 65-71.
- Jimenez, M.A., Schmid, H., von Lützow, M., Gtser, R. y Munch, J.C. 2002. Evidence for recycling of N from plants to soil during the growing season. *Geoderma*, 105, 223-241.
- Joergensen, R.G., Schmaedeke, F., Windhorst, K. y Meyer, B. 1995. Biomass and activity of microorganism in a fuel oil contaminated soil. *Soil Biol. Biochem.* 27, 1137-1143.
- Johansen, C., Singh, D.N., Krishnamurthy, L., Saxena, N.P., Chauhan, Y.S., Kumar, J. 1997. Options for alleviating moisture stress in pulse crops. In: Asthana, A.N., Masood Ali (Eds). *Recent Advances in Pulses Research*. Indian Society of Pulses research and development, IIPR, Kanpur, India, pp. 425-442.

- Johnson, M.G., Tingey, D.T., Phillips, D.L. y Storm, M.J. 2001. Patterns of ponderosa pine fine root growth as affected by elevated CO₂: initial results. *Plant Physiol.* 14, 81-88.
- Johnson, M.G., Tingey, D.T., Phillips, D.L. y Storm, M.J. 2001. Advancing fine root research with minirhizotrons. *Environ. Ex. Bot.* 45, 263-289.
- Jones, D.L. 1998. Organics acids in the rhizosphere-a critical review. *Plant Soil* 205, 25-44.
- Jones, D.L. y Kielland, K. 2002. Soil amino acid turnover dominates the nitrogen flux in permafrost-dominated taiga forest soils. *Soil Biol. Biochem.* 34, 209-219.
- Joslin, J.D., Wolfe, M.H. 1998. Impacts of water input manipulation on fine root production and mortality in a mature hardwood forest. *Plant Soil* 204, 165-174.
- Karlen, D.L., Varvel, G.E., Bullock, D.G. y Cruse, R.M. 1994. Crop rotation for the 21st century. *Adv. Agron.* 53, 1-37.
- Kashiwagi, J., Krishnamurthy, L., Crouch, J.H. y Serraj, R. 2006. Variability of root length density and its contributions to seed yield in chickpea (*Cicer arietinum* L.) under terminal drought stress. *Field Crops Res.* 95, 171-181.
- Kessel, C. y Hartley, C. 2000. Agricultural management of grain legumes: has it led to an increase in nitrogen fixation? *Field Crop Res.* 65, 165-181.
- Khan, D.F., Peoples, M.B., Chalk, P.M. y Herridge, D.F. 2002. Quantifying below-ground nitrogen of legumes 2. A comparison of ¹⁵N and non isotopics methods. *Plant Soil* 239, 277-289.
- King, J.S., Albaugh, T.J., Allen, H.L., Buford, M., Strain, B.R. y Dougherty, P. 2002. Below-ground carbon input to soil is controlled by nutrient availability and fine root dynamics in loblolly pine. *New Phytol.* 154, 389-398.

Referencias

- Kirkham, D. y Bartholomew, W.V. 1954. Equations for following nutrients transformations in soil, utilizing tracer data. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 19, 189-192.
- Kloppel, B.D. y Gower, S.T. 1995. Construction and installation of acrylic minirhizotron tubes in forest ecosystems. *Soil Sci. Am. J.* 59, 241-243.
- Kooistra, M.J., Schoonderbeek, D., Boone, F.R., Veen, B.W. y van Noordwijk, M. 1992. Root-soil contact of maize, as measured by a thin-section technique. II. Effects of soil compaction. *Plant and Soil* 139, 119-129.
- Kubiske, M.E., Pregitzer, K.S., Zak, D.R. y Mikan, C.J. 1998. Growth and C allocation of *Populus tremuloides* genotypes in response to atmospheric CO₂ and soil N availability. *New Phytol.* 140, 251-260.
- Kucke, M., Schmid, H. y Spiess, A. 1995. A comparison of four methods for measuring roots of field crops in three contrasting soils. *Plant Soil* 172, 63-71.
- Kuickman, P.J., Jansen, A.G., Van Veen, J. y Zehnder, A.J. 1990. Protozoan predation and the turnover of soil organic carbon and nitrogen in the presence of plants. *Biol. Fert. Soils.* 10, 22-28.
- Kuzyakov, Y. 2002. Review: factors affecting rhizosphere priming effects. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 165, 382-396.
- Kuzyakov, Y y Domanski, G. 2000. Carbon input by plants into the soil: Review. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 163, 421-431.
- La Rue, T. y Patterson, T.G. 1981. How much nitrogen do legumes fix? *Adv. Agron.* 34, 15-38.
- Ledgard, S.F. y Peoples, M.B. 1988. Measurements of nitrogen fixation in the field. In: Wilson, J.R. (Ed.), *Advances in nitrogen cycling in agricultural ecosystems*. CAB International, Wallingford, U.K. pp. 351-367.

- Ledgard, S.F. 1989. Nutrition, moisture and rhizobial strain influence isotopic fractionation during N₂ fixation in pasture legumes. *Soil Biol. Biochem.* 21, 65-68.
- Levan, M.A., Ycas, J.W. y Hummel, J.W. 1987. Light leak effects on near-surface soybean rooting observed with minirhizotrons. En: *Minirhizotron observation tubes: Methods and applications for measuring rhizosphere dynamics*(Ed: H.M. Taylor). ASA Special Publication n° 50. American Society of Agronomy, Madison, WI, pp 89-98.
- Liljeroth, E., Van Veen, J. y Miller, H. 1990. Assimilate translocation to the rhizosphere of two wheat lines and subsequent utilization by rhizosphere microorganisms at two soil nitrogen concentrations. *Soil Biol. Biochem.* 22, 1015-1021.
- Loomis, R.S. y Connor, D.J. 1992. *Crop Ecology*. Cambridge University Press. New York.
- López, B., Sabate, S. y Gracia, C. 1998. Fine roots dynamics in a Mediterranean forest: effects on drought and ítem density. *Tree Physiol.* 18, 601-606.
- López Bellido, L. 1992. Mediterranean cropping systems. En “ *Ecosystems of the World. Field Crops Ecosystems*” (Ed. C.J. Pearson). Elsevier. Ámsterdam. pp. 311-356.
- López Bellido, L. 1994. Role of the legume crops in a sustainable agricultura. The case of lupins. *Proceeding VII Internacional Lupin Conference*. Evora, Portugal 18-23 abril, 1992. pp. 125-150.
- López Bellido, L., Fuentes, M., Castillo, J.E. López Garrido, F.J. y 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.

Referencias

- López Bellido, L. y López-Bellido, R.J. 1999. Sistemas agrícolas de secano mediterráneos. Congreso Europeo de Agricultura Sostenible en ambientes Mediterráneos. Badajoz, 22-25 marzo. pp. 105-112.
- López Bellido, L. y López-Bellido, R.J. 2000. Efectos ambientales de la rotación trigo-girasol. *Vida Rural*. 104, 24-31.
- López Bellido, R.J. y López-Bellido, L. 2001. Efficiency of nitrogen in wheat under Mediterranean conditions: effect of tillage, crop rotation and N fertilization. *Field Crops Res.* 71, 31-46.
- López-Bellido, R.J., López-Bellido, L., Castillo, J.E y 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, R.J., López-Bellido, L., López-Bellido, F.J. y Castillo, J.E. 2003. Faba bean (*Vicia faba* L.) response to tillage and soil residual nitrogen in a continuous rotation with wheat under rainfed Mediterranean conditions. *Agron. J.* 95, 1253-1261.
- López-Bellido, L., López-Bellido, R.J., Castillo, J.E. y 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 Crops Res.* 88 (2-3), 191-200.
- López-Bellido, R.J., López-Bellido, F.J., Castillo, J.E y López-Bellido, L. 2005. No laboreo y almacenamiento de agua en los suelos de la campiña andaluza. *Vida Rural* 215, 34-38.
- López-Bellido, L.; López-Bellido, R.J.; Redondo, R. y Benítez, J. 2006. Faba bean nitrogen fixation in a wheat-based rotation under rainfed Mediterranean conditions: Effect of tillage system. *Field Crops Res* 98, 253-260.

- Lory, J.A. Ruselle, M.P. y Heichel, G.H. 1992. Quantification of symbiotically fixed nitrogen in soil surrounding alfalfa roots and nodules. *Agron. J.* 84, 1033-1040.
- Mackay, A.D. y Kladvko, E.J. 1985. Earthworms and rate of breakdown of soyabean and maize residues in soil. *Soil Biol. Biochem.* 17, 851-857.
- Majdi, H. y Kangas, P. 1997. Demography of fine roots in response to nutrient applications in a Norway spruce stand in southwestern Sweden. *Ecoscience* 4, 199-205.
- Manschadi, A.M., Sauerborn, J.; Stützel, H.; Göbel, W. y Saxena, M. 1998. Simulation of faba bean (*Vicia faba* L.) root system development under Mediterranean conditions. *Eur. J. Agron.* 9, 259-272.
- Marchner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. Academic Press, San Diego, CA.
- Marshall, T.J y Holmes, J. 1988. Soil physics. 2nd ed. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- Mayer, J., Buegger, F., Jensen, E.S. Schloter, M. y Heb, J. 2003. Estimating N rhizodeposition of grain legumes using a ¹⁵N in situ stem labelling method. *Soil Biol. Biochem.* 35, 21-28.
- McNeil, A.M., Zhu, C. y Fillery, I.R. 1997. Use of in situ ¹⁵N labeling to estimate the total below-ground nitrogen of pasture legumes in intact soil plant systems. *Aus. J. Agric. Res.* 48, 295-304.
- McNeil, A.M., Zhu, C. y Fillery, I.R. 1998. A new approach to quantifying the N benefit from pasture legumes succeeding wheat. *Aust. J. Agric. Res.* 49, 427-436.
- Mengel, K. y Kirkby, E.A. 1982. Principles of plant nutrition. International Potash Institut. Berna.

Referencias

- Merckx, R., den Hartog, A. y Van Veen, J.A. 1985. Turnover of root derived material and related microbial biomass formation in soils of different texture. *Soil Biol. Biochem.* 17, 565-569.
- Merrill, S.D., y Upchurch, D.R. 1994. Converting root numbers observed at minirhizotrons to equivalent root length density. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1061-1067.
- Merrill, S.D., Black, A.L. y Bauer, A. 1996. Conservation tillage affects root growth of dryland spring wheat under drought. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 575-583.
- Merrill, S.D., Tanaka, D.L. y Hanson, J.D. 2002. Root length growth of eight crop species in Haplustoll soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 66, 913-923.
- Miethling, R., Wieland, G., Backhaus, H. y Tebbe, C.C. 2000. Variation of microbial rhizosphere communities in response to crop species, soil origin, and inoculation with *Sinorhizobium meliloti* L33. *Microbial Ecol.* 41, 43-56.
- Miller, P.R., McConkey, B.G., Clayton, G.W., Brandt, S.A., Staricka, J.A., Johnston, A.M., Lanford, G.P., Schatz, B.G., Baltensperger, D.D. y Nelly, K.E. 2002. Pulse crop adaptation in the northern Great Plains. *Agron. J.* 94, 261-272.
- Moran, C.J., Pierret, A. y Stevenson, A.W. 2000. X-ray absorption and phase contrast image to study the interplay between plant and soil structure. *Plant Soil* 223, 99-115.
- Myers, R.J.K. 1982. Nitrogen cycling. En: "Nitrogen fixation in legumes" (Ed. J.M. Vicent). Academic Press. Australia. pp. 239-251.
- Newman, E.I. 1966. A method for estimating the total length of root in a sample. *J. Appl. Ecol.* 3, 139-145.

- van Noordwijk, M., Brouwer, G., Meijboom, F., do Rosario, M., Oliveira, G. y Bengough, A.G. 2000. Trench profile techniques and core break methods. En: *Root Methods: A Handbook*. (Ed. A.L. Smith). Berlin: Springer-Verlag, 175-210.
- Papastylianou, I. 1993. Productivity and nitrogen fertilizer requirements of barley in rotation systems in rainfed Mediterranean conditions. *Eur. J. Agron.* 2, 119-129.
- Pavlychenko, T.K. 1937. Quantitative study of entire root systems of weed and crop plants under field conditions. *Ecology* 18, 62-79.
- Peoples, M.B. y Herridge, D.F. 1990. Nitrogen fixation by legumes in tropical and subtropical agriculture. *Adv. Agron.* 44, 155-223.
- Peoples, M.B., Turner, G.L., Shah, Z., Aslam, M., Ali, S., Maskey, S., Batthary, S., Afandi, F., Schwenke, G. y Herridge, D. 1997. Evaluation of the ¹⁵N natural abundance technique for measuring N₂ fixation in experimental plots and farmer's fields. En: Rupela, O. (Eds). *Extending Nitrogen fixation research to farmer's fields*. ICRISAT. India, pp. 57-75.
- Peoples, M.B., Bowman, A.M., Gault, R.R., Herridge, D.F., McCallum, M., McCormick, K., Norton, R., Rochester, I. y Scammell, G. 2001. Factors regulating contributions of fixed nitrogen by pasture and crop legumes to different farming systems of eastern Australia. *Plant Soil* 228, 29-41.
- Phillips, R.E. 1986. Humedad del suelo. En: "Agricultura sin laboreo. Principios y aplicaciones" (Eds. R.E. Phillips y S.H. Phillips). Ediciones Bellaterra. Barcelona. pp. 69-90.
- Pierce, F.J. y Rice, C.W. 1988. Crop rotation and its impact of efficiency of water and nitrogen use. En: "Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen" (Ed. W.L. Hargrove). ASA. Special Publication n° 15. Wisconsin. pp.101-113.

Referencias

- Pierret, A., Doussan, C., Garrigues, E. y Kirby, J.M. 2003. Observating plants roots in their environment: current imaging options and specific contribution of two-dimensional approaches. *Agronomie* 23, 471-479.
- Power, J.F. y Doran, J.W. 1988. Role of crop residue management in nitrogen cycling and use. E: "Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen" (Ed. W.L. Hargrove). ASA. Special Publication n° 15. Wisconsin. pp.101-113.
- Power, J.F. 1990. Legumes and crop rotations. En "Sustainable agriculture and Temperate zones" (Eds. Ch. A. Francis, C.B. Flora y L.D. King). John Willey & Sons, Inc. New York. pp. 178-204.
- Powlson, D.S. y Barraclough, D. 1993. Mineralization and assimilation in soil-plant systems. En: Nitrogen isotope techniques". Academic Press Inc. pp. 209-242.
- Pregitzer, K.S. 2002. Fine roots of trees- a new perspective. *New Phytol.* 154, 267-273.
- Pregitzer, K.S., DeForest, J.L., Burton, A.J., Allen, M.F., Ruess, R.W. y Hendrick, R.L. 2002. Fine root architecture of nine North America trees. *Ecological Monographs* 72, 293-309.
- Prins, W.H., Dilz, K. y Neeteson, J.J. 1998. Current recomendations for nitrogen fertilization within the EEC in relation to nitrate leaching. *Proceedings of Fertilizer Society.* Londres, N° 276.
- Probert, M.E., Fergus, I.F., Bridge, B.J., McGarry, D., Thompson, C.H. y Russell, J.S. 1987. The properties and managements of Vertisols. C.A.B. International. IBSRAM. U.K.
- Rasmunssen, P.E. y Collins, H.P. 1991. Long-term impacts of tillage, fertilizer and crop residue an soil organic matter in temperate semiarid regions. *Adv. Agron.* 45, 93-134.

- Reeves, T.G. 1984. Lupin in crop rotation. Proceeding 3rd International Lupin Conference. La Rochelle. Francia. Junio 1984. pp. 208-226.
- Regent Instruments. 2005. User Guide, Winrhizotron 2005a, Reference, Regent Instruments Inc. Canada.
- Reid, J.B. y Goss, M.J. 1982. Suppression of the decomposition of ¹⁴C labelled plants roots in the presence of living roots of maize and perennial ryegrass. J. Soil Sci. 33, 387-395.
- Reid, J.B. y Goss, M.J. 1983. Growing crops and transformations of ¹⁴C labelled soil organic matter. Biol. Fert. Soils. 7, 67-70.
- Reiter, K., Schmidtke, K. y Rauber, R. 2002. The influence of long-term tillage systems on symbiotic N₂ fixation of pea (*Pisum sativum* L.) and red clover (*Trifolium pratense* L.). Plant Soil 238, 41-55.
- Rennie, R.J. y Dubetz, 1986. Nitrogen-15-determined nitrogen fixation in field grown chickpea, lentil, fababean and field pea. Agron. J. 78, 654-660.
- Richards, J.H., 1984. Root growth response to defoliation in two Agropyron bunchgrasses: field observations with an improved root periscope. Oecologia 64, 21-25.
- Robinson, D. y Rorison, H.I. 1983. A comparison of the response of *Lolium perenne* L., *Holcus lanatus* L. and *Deschampsia flexuosa* Trin. To a localised supply of nitrogen. New Phytol. 94, 263-273.
- Rochester, I. J., Peoples, M.B., Constable, G.A. y Gault, R.R. 1998. Faba beans and other legumes add nitrogen to irrigated cotton cropping systems. Aust. J. Exp. Agric. 38, 253-260.

Referencias

- Ross, P.J., Martin, A.E. y Henzell, E.F. 1964. A gas-tight growth chamber for investigating gaseous nitrogen changes in the soil: plant-atmosphere system. *Nature* 204, 444-447.
- Rovira, A.D., Foster, R.C. y Martin, J.K. 1979. Note on terminology : origin nature and nomenclature of organic materials in the rhizosphere. En: (Ed: J.L. Harley) *The soil-root interface*, Academic Press, London. pp. 1-4.
- Roco, E. y Mengel, K. 2000. Nitrogen losses from entire plants of spring wheat (*Triticum aestivum*) from tillering to maturation. *Eur. J. Agron.* 13, 101-110.
- do Rosario, G., Oliveira, M., van Noordwijk, M., Gaze, S.R., Brouwer, G., Bona, S., Mosca, G. y Hairiah, K. 2000. Auger sampling, ingrowth cores and pinboard methods. En: *Root Methods: A Handbook*. (Ed. A.L. Smith). Berlin: Springer-Verlag, 175-210.
- Russell, C.A. y Fillery, I.R. 1996a. Estimates of lupin below-ground biomass nitrogen, dry matter, and nitrogen turnover to wheat. *Aust. J. Agric. Res.* 47, 1047-1059.
- Russell, C.A. y Fillery, I.R. 1996b. In situ ¹⁵N labelling of lupin below ground biomass. *Aus. J. Agr. Res.* 47, 1035-1046.
- Ruselle, M.D., Hesterman, O.B., Shaeffer, C.C. y Heichel, G.H. 1987. Estimating nitrogen and rotation effects in legume-corn rotation. En "The role of legumes in conservation tillage systems" (Ed. J.F. Power). *Soil Conserv. Soc. A., Iowa*. pp. 41-42.
- Sawatsky, N. y Soper, R.J. 1991. A quantitative measurement of the nitrogen loss from the root system of field peas (*Pisum arvense* L.) grown in the soil. *Soil Biol. Biochem.* 23, 255-259.

- Schimel, J.P., Jackson, L. y Firestone, M. 1989. Spatial and temporal effects on plant microbial competition for inorganic nitrogen in a California annual grassland. *Soil Biol. Biochem.* 21, 1059-1066.
- Schmidtke, K. 1996. Methodik zur Ermittlung der N-Flächenbilanz beim Anbau von Leguminosen. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* 9, 43-44.
- Schmidtke, K. 2005. How to calculate nitrogen rhizodeposition: a case study in estimating N rhizodeposition in the pea (*Pisum sativum* L.) and grasspea (*Lathyrus sativus* L.) using a continuous ^{15}N labelling split-root technique. *Soil Biol. Biochem.* 37, 1893-1897.
- Schwenke, G., Peoples, G., Turner, G y Herridge, D. 1998. Does nitrogen fixation of commercial dryland chickpea and faba bean crops in north-west New South Wales maintain or enhance soil nitrogen? *Aus. J. Expt. Agric.* 38, 61-70.
- Shearer, G. y Kohl, D.H. 1986. N_2 fixation in field settings: estimates based on natural ^{15}N abundance. *Aust. J. Plant Physiol.* 13, 699-756.
- Silgran, M. y Shepherd, M.A. 1999. The effects of cultivation on soil nitrogen mineralization. *Adv. Agron.* 65, 267-303.
- Smalla, K., Wachtendorf, U., Heuer, H., Liu, W. y Forney, L. 2002. Analysis of BIOLOG GN substrate utilization patterns by microbial communities. *Appl. Environ. Microb.* 64, 1220-1225.
- Smit, A.L., George, E., Groenwold, J. 2000. Root observations and measurements at (transparent) interfaces with soil. En: *Root Methods: A Handbook*. (Ed. A.L. Smith). Berlin: Springer-Verlag, 175-210.

Referencias

- Souza, A., Colozzi-Filho, A. y Giller, K.E. 2003. The soil microbial community and soil tillage. En (Eds: A. El Titi) Soil Tillage in Agroecosistemas. CRC Press, London, pp. 51-81.
- Steele, S.J., Gower, S.T., Vogel, J.G. y Norman, J.M. 1997. Root production, net primary production and turnover in aspen, jack pine and black spruce forest in Saakatchewan and Manitoba, Canada. *Tree Physiol.* 17, 577-587.
- Stockdale, E.A., Gaunt, J.L. y Vos, J. 1997. Soil-plant nitrogen dynamics: what concepts are required? *Eur. J. Agron.* 7, 145-159.
- Ta, T.C., Macdowall, F. y Faris, M. 1986. Excretion of nitrogen assimilated from N₂ fixed nodulated roots of alfalfa (*Medicago sativa*). *Canadian J. Bot.* 64, 2063-2067.
- Taylor, H.M. 1997. Minirhizotron observation tubes: methods and applications for measuring rhizosphere dynamics. Am. Soc. Agron. Madison, WI. ASA Special Publication n° 50.
- Tisdale, S.L y Nelson, W.L. 1970. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. Ediciones Montaner y Simón S.A. Barcelona.
- Tisdall, J.M. y Oades, J.M. 1982. Organic matter and water stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33, 141-163.
- Thomas, A.C. y Fukai, A.D. 1995. Growth and yield response of barley and chickpea to water stress under three environments in southeast Queensland. I. Light interception, crop growth and grain yield. *Aus. J. Agric. Res.* 46, 17-33.
- Thomas, A.C., Fukai, A.D. y Hammer, G.L. 1995. Growth and yield response of barley and chickpea to water stress under three environments in southeast Queensland. II. Root growth and soil water extraction pattern. *Aus. J. Agric. Res.* 46, 35-48.

- Thomas, S.M., Whitehead, D., Reid, J.B., Cook, F.J., Adams, J.A. y Leckie, A.C. 1999. Growth, loss and vertical distribution of *Pinus radiata* fine roots growing at ambient and elevated CO₂ concentration. *Global Change Biol.* 5, 107-121.
- Toderi, G. 1987. Lavorazioni: stato attuale delle conoscenze e prospettive. *Esercitazioni dell'Accademia Agraria in Pesaro.* 19, 121-150.
- Traoré, O., Groleaud-Renaud, V., Plantureux, S., Tubeileh, A. y Bœuf-Tremblay, V. 2000. Effect of root mucilage and modelled root exudates on soil structure. *Eur. J. Soil Sci.* 51, 575-581.
- Turpin, J.E., Herridge, D.F. y Robertson, M.J. 2002. Nitrogen fixation and soil nitrate interactions in field growth chickpea (*Cicer arietinum*) and faba bean (*Vicia faba*). *Aus. J. Agric. Res.* 53, 599-608.
- Unkovich, M.J., Pate, J.S., Sanford, P. y Armstrong, E.L. 1994. Potential precision of the $\delta^{15}\text{N}$ natural abundance method in field estimates of nitrogen fixation by crop and pasture legume in South-West Australia. *Aus. J. Agric. Res.* 45, 119-132.
- Unkovich, M.J. y Pate, J.S. 1998. Symbiotic effectiveness and tolerance to early season nitrate availability in indigenous populations of subterranean clover rhizobia from SW Australian pastures. *Soil Biol. Biochem.* 30, 1435-1443.
- Unkovich, M.J. y Pate, J.S. 2000. An appraisal of recent field measurements of symbiotic N₂ fixation by annual legumes. *Field Crops Res.* 65, 211-228.
- Unger, P.W. 1994. Tillage effects on dryland wheat and sorghum production in the southern Great Plains. *Agron. J.* 86, 310-314.
- Urbano, P. 1989. *Tratado de Fitotécnia General.* Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.

Referencias

- Valles de la Mora, B., Cadisch, G. y Aluja-Schunemann, A. 2003. Comparison of isotope methodologies to assess N₂ fixation and its fate in plants and soils. *Agrociencia* 37, 117-128.
- Van Gestel, M., Merckx, R. y Balzac, K. 1993. Microbial biomass responses to oil drying and rewetting. The fate of a fast growing and slow growing microorganisms in soil from different climates. *Soil Biol. Biochem.* 25, 109-123.
- Van Noordwijk, M., de Jager, A. y Floris, J. 1985. A new dimension to observations in minirhizotrons: a stereoscopic view on root photographs. *Plant Soil*, 86, 447-453.
- Van Veen, J.A., Liljeroth, E., Lekkerkerk, L. y Van de Geijn, S. 1991. Carbon fluxes in plant-soil systems at elevated atmospheric CO₂ levels. *Ecol. Appl.* 1, 175-181.
- Vinten, A.J.A., Vivian, B.J. y Howard, R.S. 1992. The effect of nitrogen fertilizer on the nitrogen cycle of two upland arable soils of contrasting textures. *Proceedings of the Fertilizer Society. Cambridge.* N° 329. pp. 48.
- Virtanen, A.I. y Laine, T. 1935. Chemical nature of the amino acids excreted by leguminous root nodules. *Nature* 136, 756-757.
- Vogt, K.A., Grier, C.C. y Vogt, D.J. 1986. Production, turnover and nutrient dynamics of above and below-ground detritus of world forest. *Adv. Ecol. Res.* 15, 303-377.
- Volkmar, K.M. 1993. A comparison of minirhizotron techniques for estimating root length density in soils of different bulk densities. *Plant Soil* 157, 239-245.
- Wang, J. y Bakken, L.R. 1997. Competition for nitrogen during decomposition of plant residues in soil: effects of spatial placement of N-rich and N-poor plant residues. *Soil Biol. Biochem.* 29, 153-162.
- Weber, E.P. y Day, F.P. 1996. The effects of nitrogen fertilization on the phenology of roots in a barrier island sand dune community. *Plant Soil* 182, 139-148.

- Wessel, W.W. y Tietema, A. 1992. Calculating gross N transformation rates of ^{15}N pool dilution experiments with acid forest litter: analytical and numerical approaches. *Soil Biol. Biochem.* 24, 931-942.
- Wells, C.E. y Eissenstat, D.M. 2001. Marked differences in survivorship among apple roots of different diameters. *Ecology* 82, 882-892.
- Whipps, J.M. y Lynch, J.M. 1985. Energy losses by the plant in the rhizosphere. *Annual Proceeding of the Phytochemical Society of Europe* 26, 59-71.
- Wilson, A.J., Robards, A. y Goss, M. 1977. Effects of mechanical impedance on root growth in barley (*Hordeum vulgare* L) II. Effects on cell development in seminal roots. *J. Exp. Bot.* 28, 1216-1277.
- Yamaguchi, J. y Tanaka, A. 1990. Quantitative observation on the root system of various crops growing in the field. *Soil Sci. Plant Nutr.* 36, 483-493.
- Yanai, R.D., Fahey, T.J. y Miller, S.L. 1995. Efficiency of nutrient acquisition by fine roots and mycorrhizae. En: *Resource Physiology of Conifers: Acquisition, Allocation and Utilization*. Smith, W.K. y Hinckley, T.M. (Eds). Academic Press, San Diego, CA. pp 75-103.
- Zagal, E. 1994. Influence of light intensity on the distribution of carbon and consequent effects on mineralization of soil nitrogen in barley (*Hordeum vulgare* L.) soil system. *Plant Soil* 160, 21-31.
- Zak, D.R. y Pregitzer, K.S. 1998. Integration of ecophysiological and biogeochemical approaches to ecosystem dynamics. En: "Successes, limitations and frontiers in ecosystems science. (Eds. M.L. Pace y P.M. Groffman). Springer-Verlag. New York.
- Zobel, R. 2003. Fine roots-discarding flawed assumptions. *New Phytol.* 160, 276-278.

ANEJOS

ANEJOS.

Tabla I. Análisis de la varianza (media de cuadrados) del rendimiento del trigo. Años 2003-04, 2004-05 y análisis conjunto.

Año	Fuente	GL ^a	MC ^b	F
		————— Kg ha ⁻¹ —————		
2003-04	Laboreo	1	849556	2.19
	Error	3	387415	
2004-05	Laboreo	1	2155926	10.38*
	Error	3	207622	
Análisis conjunto	Año (A)	1	6.054 x10 ⁷	102.53***
	Error a	6	502305	
	Laboreo (L)	1	2856100	9.6*
	AxL	1	149382	0.5
	Error b	6	297519	

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^aGrados de libertad, ^bMedia de cuadrados

Tabla II. Análisis de la varianza (media de cuadrados) del rendimiento del girasol. Años 2003-04, 2004-05 y análisis conjunto.

Año	Fuente	GL ^a	MC ^b	F
		————— Kg ha ⁻¹ —————		
2003-04	Laboreo	1	68820.5	0.37
	Error	3	184952	
2004-05	Laboreo	1	114242	39.84**
	Error	3	2867.33	
Análisis conjunto	Año (A)	1	4262160	43.37***
	Error a	6	98282.6	
	Laboreo (L)	1	2862.25	0.03
	AxL	1	180200	1.92
	Error b	6	93909.9	

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^aGrados de libertad, ^bMedia de cuadrados

Tabla III. Análisis de la varianza (media de cuadrados) del rendimiento de las habas. Años 2003-04, 2004-05 y análisis conjunto.

Año	Fuente	GL ^a	MC ^b	F
		————— Kg ha ⁻¹ —————		
2003-04	Laboreo	1	1475762	41.16**
	<i>Error</i>	3	35858.0	
2004-05	Laboreo	1	93744.5	96.49**
	<i>Error</i>	3	971.5	
Análisis conjunto	Año (A)	1	7185080	61.91***
	<i>Error a</i>	6	116060	
	Laboreo (L)	1	1156700	62.81***
	AxL	1	412806	22.42**
	<i>Error b</i>	6	18414.7	

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad, ^b Media de cuadrados

Tabla IV. Análisis de la varianza del rendimiento del garbanzo. Años 2003-04, 2004-05 y análisis conjunto.

Año	Fuente	GL ^a	MC ^b	F
		————— Kg ha ⁻¹ —————		
2004-05	S. Laboreo	1	44551.1	37.84**
	<i>Error</i>	3	1177.46	

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad, ^b Media de cuadrados

Tabla V. Análisis de la varianza (media de cuadrados) de la densidad radicular (cm cm^{-3}) del trigo. Años 2003-04, 2004-05 y análisis conjunto.

Profundidad	Fuente	GL ^a	Año		GL	Análisis conjunto
			2003-04	2004-05		
0-10 cm	Año (A)				1	3.4018
	Error a				2	0.3792
	Laboreo (L)	1	1.6813*	0.0008	1	0.8139*
	A x L				1	0.8676*
	Error b	2	0.1151	0.0388	4	0.0622
10-20 cm	Año (A)				1	2.7942
	Error a				2	0.2089
	Laboreo (L)	1	0.0021	0.0073	1	0.0001
	A x L				1	0.0056
	Error b	2	0.0645	0.0335	4	0.0406
20-30 cm	Año (A)				1	0.6834*
	Error a				2	0.0077
	Laboreo (L)	1	0.0021	0.0063	1	0.0052
	A x L				1	0.0001
	Error b	2	0.0067	0.0048	4	0.0551
30-40 cm	Año (A)				1	1.6555*
	Error a				2	0.0287
	Laboreo (L)	1	0.0374	0.0188	1	0.0046
	A x L				1	0.0421
	Error b	2	0.0095	0.0062	4	0.0063
40-55 cm	Año (A)				1	0.1965
	Error a				2	0.0354
	Laboreo (L)	1	0.0178	0.0064	1	0.0029
	A x L				1	0.0181
	Error b	2	0.0133	0.0078	4	0.0086
55-70 cm	Año (A)				1	0.0163*
	Error a				2	0.0009
	Laboreo (L)	1	0.0018	0.0187	1	0.0014
	A x L				1	0.0098
	Error b	2	0.0004	0.005	4	0.0014
70-85 cm	Año (A)				1	0.0028*
	Error a				2	0.0017
	Laboreo (L)	1	0.0029	0.0141	1	0.0095
	A x L				1	0.0004
	Error b	2	0.0255	0.0016	4	0.0131
0-85 cm	Año (A)				1	39.105*
	Error a				2	1.0671
	Laboreo (L)	1	2.604	0.1143	1	0.9447
	A x L				1	1.7165*
	Error b	2	0.2607	0.2119	4	0.1834

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad

Tabla VI. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-5}$) del área radicular ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-3}$) del trigo. Años 2003-04, 2004-05 y análisis conjunto.

Profundidad	Fuente	GL ^a	Año		GL	Análisis conjunto
			2003-04	2004-05		
0-10 cm	Año (A)				1	165
	Error a				2	14
	Laboreo (L)	1	87.09*	0.4137	1	39*
	A x L				1	48*
	Error b	2	3.658	2.02	4	2
10-20 cm	Año (A)				1	180*
	Error a				2	5
	Laboreo (L)	1	32.52	5.268	1	27*
	A x L				1	8
	Error b	2	3.373	1.184	4	2
20-30 cm	Año (A)				1	24.69*
	Error a				2	0.5416
	Laboreo (L)	1	0.0791	1.102	1	0.1062
	A x L				1	0.5241
	Error b	2	4.114	0.0606	4	2.072
30-40 cm	Año (A)				1	73.10*
	Error a				2	1.735
	Laboreo (L)	1	0.4203	0.1658	1	0.0649
	A x L				1	0.4383
	Error b	2	0.4764	0.3101	4	0.3157
40-55 cm	Año (A)				1	8.523
	Error a				2	1.477
	Laboreo (L)	1	0.2908	0.1512	1	0.0349
	A x L				1	0.3315
	Error b	2	0.3912	0.2672	4	0.2624
55-70 cm	Año (A)				1	0.743*
	Error a				2	0.0132
	Laboreo (L)	1	0.0642	0.4583*	1	0.0253
	A x L				1	0.268
	Error b	2	0.0118	0.1648	4	0.0471
70-85 cm	Año (A)				1	0.1565
	Error a				2	0.0528
	Laboreo (L)	1	0.1026	0.4127	1	0.3
	A x L				1	0.0089
	Error b	2	0.9127	0.0508	4	0.4708
0-85 cm	Año (A)				1	1931*
	Error a				2	32
	Laboreo (L)	1	19.97	16.03	1	1
	A x L				1	27
	Error b	2	11.02	15.22	4	9

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad

Tabla VII. Análisis de la varianza (media de cuadrados) de la biomasa radicular (kg ha⁻¹) del trigo. Años 2003-04, 2004-05 y análisis conjunto.

Profundidad	Fuente	GL ^a	Año		GL	Análisis conjunto
			2003-04	2004-05		
0-10 cm	Año (A)				1	695884
	<i>Error a</i>				2	65947
	Laboreo (L)	1	325783*	427	1	237797
	A x L				1	218060
	<i>Error b</i>	2	42668	8952	4	32076
10-20 cm	Año (A)				1	271709*
	<i>Error a</i>				2	9816
	Laboreo (L)	1	7059	2871	1	1889
	A x L				1	9419
	<i>Error b</i>	2	7506	2042	4	5760
20-30 cm	Año (A)				1	505189
	<i>Error a</i>				2	278137
	Laboreo (L)	1	285092*	1830	1	218928
	A x L				1	180720
	<i>Error b</i>	2	324974	410	4	227358
30-40 cm	Año (A)				1	25550*
	<i>Error a</i>				2	366
	Laboreo (L)	1	2522	2382	1	309
	A x L				1	4410
	<i>Error b</i>	2	1338	740	4	1121
40-55 cm	Año (A)				1	1668
	<i>Error a</i>				2	988
	Laboreo (L)	1	1002	7721	1	690
	A x L				1	3792*
	<i>Error b</i>	2	926	460	4	403
55-70 cm	Año (A)				1	0.11
	<i>Error a</i>				2	1663
	Laboreo (L)	1	0.83	5764	1	1480
	A x L				1	1402
	<i>Error b</i>	2	25.3	1523	4	388
70-85 cm	Año (A)				1	979*
	<i>Error a</i>				2	17.26
	Laboreo (L)	1	0.371	5071*	1	1292*
	A x L				1	1243*
	<i>Error b</i>	2	339.5	203	4	156
0-85 cm	Año (A)				1	499945*
	<i>Error a</i>				2	241105
	Laboreo (L)	1	40488	129254	1	396
	A x L				1	115344
	<i>Error b</i>	2	504996	39291	4	366921

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^aGrados de libertad

Tabla VIII. Análisis de la varianza (media de cuadrados) del N radicular (kg ha⁻¹) del trigo. Años 2003-04, 2004-05 y análisis conjunto.

Profundidad	Fuente	GL ^a	Año		GL	Análisis conjunto
			2003-04	2004-05		
0-10 cm	Año (A)				1	71.235*
	<i>Error a</i>				2	2.5808
	Laboreo (L)	1	43.692*	0.227	1	19.67**
	A x L				1	24.12**
	<i>Error b</i>	2	1.14	0.5647	4	0.7112
10-20 cm	Año (A)				1	25.124
	<i>Error a</i>				2	2.1777
	Laboreo (L)	1	4.152	0.893	1	0.9379
	A x L				1	3.6614
	<i>Error b</i>	2	4.738	0.6777	4	2.5387
20-30 cm	Año (A)				1	61.136
	<i>Error a</i>				2	20.846
	Laboreo (L)	1	37.425*	0.3311*	1	21.284
	A x L				1	16.306
	<i>Error b</i>	2	40.143	0.0204	4	20.077
30-40 cm	Año (A)				1	1.8198**
	<i>Error a</i>				2	0.0043
	Laboreo (L)	1	0.7911	0.2852	1	0.1309
	A x L				1	0.8028
	<i>Error b</i>	2	0.2974	0.119	4	0.1784
40-55 cm	Año (A)				1	0.0429
	<i>Error a</i>				2	0.2573
	Laboreo (L)	1	0.1828	1.0101*	1	0.0905
	A x L				1	0.4957*
	<i>Error b</i>	2	0.1807	0.0334	4	0.0485
55-70 cm	Año (A)				1	0.0516
	<i>Error a</i>				2	0.1048
	Laboreo (L)	1	0.0011	0.9001	1	0.2103
	A x L				1	0.2402
	<i>Error b</i>	2	0.091	0.13	4	0.0527
70-85 cm	Año (A)				1	0.1413
	<i>Error a</i>				2	0.0077
	Laboreo (L)	1	0.0027	0.86*	1	0.2384
	A x L				1	0.1928
	<i>Error b</i>	2	0.1619	0.0434	4	0.0468
0-85 cm	Año (A)				1	514*
	<i>Error a</i>				2	18.034
	Laboreo (L)	1	14.657	29.291	1	0.009
	A x L				1	28.27
	<i>Error b</i>	2	35.723	3.591	4	17.142

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad

Tabla IX. Análisis de la varianza (media de cuadrados) de la densidad radicular (cm cm^{-3}) de las habas. Años 2003-04, 2004-05 y análisis conjunto.

Profundidad	Fuente	GL ^a	Año		GL	Análisis conjunto
			2003-04	2004-05		
0-10 cm	Año (A)				1	0.1237
	<i>Error a</i>				2	0.0084
	Laboreo (L)	1	0.1849	0.1116	1	0.222
	A x L	1			1	0.0187
10-20 cm	<i>Error b</i>	2	0.0735	0.0261	4	0.0432
	Año (A)				1	0.0184
	<i>Error a</i>				2	0.0652
	Laboreo (L)	1	0.0347	0.0189	1	0.0039
20-30 cm	A x L	1			1	0.0402
	<i>Error b</i>	2	0.0707	0.003	4	0.0184
	Año (A)				1	0.0719
	<i>Error a</i>				2	0.0694
30-40 cm	Laboreo (L)	1	0.0111*	0.0469	1	0.0011
	A x L	1			1	0.0335
	<i>Error b</i>	2	0.0001	0.0285	4	0.0071
	Año (A)				1	0.0147
40-55 cm	<i>Error a</i>				2	0.0358
	Laboreo (L)	1	0.0949	0.0034	1	0.061
	A x L	1			1	0.0355
	<i>Error b</i>	2	0.1053	0.0138	4	0.0561
55-70 cm	Año (A)				1	0.0222
	<i>Error a</i>				2	0.0086
	Laboreo (L)	1	0.0158	0.0084	1	0.0182
	A x L	1			1	0.0018
70-85 cm	<i>Error b</i>	2	0.0069	0.0078	4	0.0037
	Año (A)				1	0.0065
	<i>Error a</i>				2	0.0048
	Laboreo (L)	1	0.0077	0.02*	1	0.0176*
0-85 cm	A x L	1			1	0.0001
	<i>Error b</i>	2	0.0018	0.0002	4	0.0014
	Año (A)				1	0.0109
	<i>Error a</i>				2	0.0013
0-85 cm	Laboreo (L)	1	0.0004	0.0022	1	0.0014
	A x L	1			1	0.0000
	<i>Error b</i>	2	0.0001	0.0018	4	0.0004
	Año (A)				1	0.2578
0-85 cm	<i>Error a</i>				2	0.6578
	Laboreo (L)	1	0.4625**	1.0578	1	0.9903**
	A x L	1			1	0.0011
	<i>Error b</i>	2	0.0012	0.073	4	0.0188

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad

Tabla X. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-5}$) del área radicular ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-3}$) de las habas. Años 2003-04, 2004-05 y análisis conjunto.

Profundidad	Fuente	GL ^a	Año		GL	Análisis conjunto
			2003-04	2004-05		
0-10 cm	Año (A)				1	5.77
	Error a				2	0.5312
	Laboreo (L)	1	11.56	8.022	1	14.6
	A x L				1	0.9773
10-20 cm	Error b	2	3.615	2.078	4	2.327
	Año (A)				1	0.5791
	Error a				2	2.968
	Laboreo (L)	1	1.201	0.4103	1	0.2069
20-30 cm	A x L				1	1.199
	Error b	2	1.302	0.1114	4	0.6789
	Año (A)				1	2.191
	Error a				2	3.053
30-40 cm	Laboreo (L)	1	0.5109*	2.525	1	0.0835
	A x L				1	1.69
	Error b	2	0.0059	1.192	4	0.3012
	Año (A)				1	0.2647
40-55 cm	Error a				2	1.387
	Laboreo (L)	1	3.906	0.0996	1	2.419
	A x L				1	1.537
	Error b	2	4.391	0.6578	4	2.36
55-70 cm	Año (A)				1	0.5619
	Error a				2	0.2823
	Laboreo (L)	1	0.6709	0.4924	1	0.8649
	A x L				1	0.0521
70-85 cm	Error b	2	0.2732	0.0053	4	0.1379
	Año (A)				1	0.194
	Error a				2	0.1721
	Laboreo (L)	1	0.3038	0.776*	1	0.6892*
0-85 cm	A x L				1	0.0027
	Error b	2	0.0699	0.0163	4	0.039
	Año (A)				1	0.0467
	Error a				2	0.055
0-85 cm	Laboreo (L)	1	0.0144	40216	1	0.0041
	A x L				1	0.0004
	Error b	2	0.0011	40253	4	0.0141
	Año (A)				1	4.691
0-85 cm	Error a				2	25.5
	Laboreo (L)	1	25.57**	52.7	1	51.92*
	A x L				1	0.0029
	Error b	2	0.251	73.14	4	1.954

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad

Tabla XI. Análisis de la varianza (media de cuadrados) de la biomasa radicular (kg ha^{-1}) de las habas. Años 2003-04, 2004-05 y análisis conjunto.

Profundidad	Fuente	GL ^a	Año		GL	Análisis conjunto
			2003-04	2004-05		
0-10 cm	Año (A)				1	78951
	<i>Error a</i>				2	33088
	Laboreo (L)	1	95656	40173	1	128776
	A x L				1	25097
	<i>Error b</i>	2	45042	13439	4	38858
10-20 cm	Año (A)				1	142.7
	<i>Error a</i>				2	4175
	Laboreo (L)	1	521.2	145.4	1	170.6
	A x L				1	631.1
	<i>Error b</i>	2	4363	394.5	4	3150
20-30 cm	Año (A)				1	3378
	<i>Error a</i>				2	14019
	Laboreo (L)	1	1790	21.6	1	1092
	A x L				1	1422
	<i>Error b</i>	2	195.2	440.3	4	246.6
30-40 cm	Año (A)				1	681.2
	<i>Error a</i>				2	134.9
	Laboreo (L)	1	3416	1516	1	3478
	A x L				1	4671
	<i>Error b</i>	2	4171	300.8	4	864.7
40-55 cm	Año (A)				1	1327
	<i>Error a</i>				2	459.1
	Laboreo (L)	1	107.1	499.1	1	286.9
	A x L				1	29.16
	<i>Error b</i>	2	329.5	579.1	4	247.2
55-70 cm	Año (A)				1	79.18
	<i>Error a</i>				2	460.1
	Laboreo (L)	1	1080	93.09	1	536
	A x L				1	182.3
	<i>Error b</i>	2	305	106.1	4	121.4
70-85 cm	Año (A)				1	190.4*
	<i>Error a</i>				2	3.454
	Laboreo (L)	1	5.9307	49.172	1	23.65
	A x L				1	4.616
	<i>Error b</i>	2	0.6486	76.793	4	19.4
0-85 cm	Año (A)				1	26917
	<i>Error a</i>				2	6548
	Laboreo (L)	1	121277	87075	1	181506
	A x L				1	17148
	<i>Error b</i>	2	48659	7465	4	35994

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad

Tabla XII. Análisis de la varianza (media de cuadrados) del N radicular (kg ha⁻¹) de las habas. Años 2003-04, 2004-05 y análisis conjunto.

Profundidad	Fuente	GL ^a	Año		GL	Análisis conjunto
			2003-04	2004-05		
0-10 cm	Año (A)				1	114.3
	<i>Error a</i>				2	55.61
	Laboreo (L)	1	156.5	30.997	1	135.2
	A x L				1	36.75
	<i>Error b</i>	2	52.51	5.7329	4	27.68
10-20 cm	Año (A)				1	6.4743
	<i>Error a</i>				2	2.4336
	Laboreo (L)	1	2.3551	0.214	1	0.729
	A x L				1	1.733
	<i>Error b</i>	2	7.6412	0.6659	4	3.987
20-30 cm	Año (A)				1	3.1855
	<i>Error a</i>				2	7.4161
	Laboreo (L)	1	4.6172	0.574	1	1.3012
	A x L				1	3.6037
	<i>Error b</i>	2	0.4558	0.1248	4	0.2591
30-40 cm	Año (A)				1	8694
	<i>Error a</i>				2	1.2144
	Laboreo (L)	1	3.1723	0.6504	1	2.7645
	A x L				1	0.733
	<i>Error b</i>	2	4.5703	0.0595	4	2.3
40-55 cm	Año (A)				1	0.0114
	<i>Error a</i>				2	0.2416
	Laboreo (L)	1	0.0098	0.0249	1	0.1672
	A x L				1	0.0175
	<i>Error b</i>	2	0.4308	0.3392	4	0.0015
55-70 cm	Año (A)				1	0.2416
	<i>Error a</i>				2	0.1672
	Laboreo (L)	1	0.8571	0.574	1	0.0175
	A x L				1	0.0015
	<i>Error b</i>	2	0.48	0.005	4	0.1819
70-85 cm	Año (A)				1	0.0082
	<i>Error a</i>				2	0.0734
	Laboreo (L)	1	0.0002	0.0141	1	0.2371
	A x L				1	0.1489
	<i>Error b</i>	2	0.0002	0.0595	4	0.1128
0-85 cm	Año (A)				1	3225.1*
	<i>Error a</i>				2	9.017
	Laboreo (L)	1	135.64	0.0249	1	139.3
	A x L				1	17.42
	<i>Error b</i>	2	70.42	0.0595	4	37.1

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad

Tabla XIII. Análisis de la varianza (media de cuadrados) de la densidad radicular (cm cm^{-3}) del garbanzo, año 2003-04.

Profundidad	Fuente	GL ^a	MC ^b
0-10 cm	Laboreo	1	0.0592
	Error a	2	0.0629
10-20 cm	Laboreo	1	0.0211
	Error a	2	0.016
20-30 a.m.	Laboreo	1	0.0211
	Error a	2	0.0304
30-40 cm	Laboreo	1	0.0033
	Error a	2	0.0238
40-55 cm	Laboreo	1	0.2291
	Error a	2	0.0725
55-70 cm	Laboreo	1	0.0001
	Error a	2	0.0015
70-85 cm	Laboreo	1	0.0009
	Error a	2	0.0076
0-85 cm	Laboreo	1	0.374*
	Error a	2	0.0098

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad; ^b Media de cuadrados

Tabla XIV. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-5}$) del área radicular ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-3}$) del garbanzo, año 2003-04.

Profundidad	Fuente	GL ^a	MC ^b
0-10 cm	Laboreo	1	4.194
	Error a	2	5.15
10-20 cm	Laboreo	1	1.629
	Error a	2	0.8952
20-30 a.m.	Laboreo	1	1.052
	Error a	2	1.049
30-40 cm	Laboreo	1	0.2129
	Error a	2	1.195
40-55 cm	Laboreo	1	9.263
	Error a	2	2.831
55-70 cm	Laboreo	1	0.0145
	Error a	2	0.1205
70-85 cm	Laboreo	1	0.1111
	Error a	2	0.4252
0-85 cm	Laboreo	1	17.75*
	Error a	2	0.3883

*,**,*** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad; ^b Media de cuadrados

Tabla XV. Análisis de la varianza (media de cuadrados) de la biomasa radicular (kg ha^{-1}) del garbanzo, año 2003-04.

Profundidad	Fuente	GL ^a	MC ^b
0-10 cm	Laboreo	1	43879
	Error a	2	11375
10-20 cm	Laboreo	1	3627
	Error a	2	1315
20-30 a.m.	Laboreo	1	2914
	Error a	2	2419
30-40 cm	Laboreo	1	7.73
	Error a	2	52.78
40-55 cm	Laboreo	1	117.6
	Error a	2	530.8
55-70 cm	Laboreo	1	77.15
	Error a	2	123.1
70-85 cm	Laboreo	1	26.3
	Error a	2	243.8
0-85 cm	Laboreo	1	9018
	Error a	2	3122

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad; ^b Media de cuadrados

Tabla XVI. Análisis de la varianza (media de cuadrados) del N radicular (kg ha^{-1}) del garbanzo, año 2003-04.

Profundidad	Fuente	GL ^a	MC ^b
0-10 cm	Laboreo	1	89.12
	Error a	2	28.64
10-20 cm	Laboreo	1	6.9567
	Error a	2	5.4432
20-30 a.m.	Laboreo	1	0.3904
	Error a	2	0.6374
30-40 cm	Laboreo	1	0.0097
	Error a	2	0.1237
40-55 cm	Laboreo	1	0.233
	Error a	2	0.0824
55-70 cm	Laboreo	1	0.003
	Error a	2	0.0079
70-85 cm	Laboreo	1	0.2518
	Error a	2	0.2518
0-85 cm	Laboreo	1	57.98
	Error a	2	44.12

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad; ^b Media de cuadrados

Tabla XVII. Análisis de la varianza (media de cuadrados) de la densidad radicular (cm cm^{-3}) del girasol, año 2003-04.

Profundidad	Fuente	GL ^a	MC ^b
0-10 cm	Laboreo	1	0.0012
	Error a	2	0.1333
10-20 cm	Laboreo	1	0.2074
	Error a	2	0.6113
20-30 a.m.	Laboreo	1	0.0061
	Error a	2	0.0069
30-40 cm	Laboreo	1	0.015*
	Error a	2	0.001
40-55 cm	Laboreo	1	0.0857
	Error a	2	0.0327
55-70 cm	Laboreo	1	0.0047
	Error a	2	0.0024
70-85 cm	Laboreo	1	0.0016
	Error a	2	0.0038
0-85 cm	Laboreo	1	0.3834
	Error a	2	1.6036

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad; ^b Media de cuadrados

Tabla XVIII. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-5}$) del área radicular ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-3}$) del girasol, año 2003-04.

Profundidad	Fuente	GL ^a	MC ^b
0-10 cm	Laboreo	1	0.0749
	Error a	2	4.488
10-20 cm	Laboreo	1	19.41
	Error a	2	45.02
20-30 a.m.	Laboreo	1	0.8674
	Error a	2	0.2314
30-40 cm	Laboreo	1	1.079
	Error a	2	0.258
40-55 cm	Laboreo	1	5.547
	Error a	2	0.7273
55-70 cm	Laboreo	1	0.1985
	Error a	2	0.1067
70-85 cm	Laboreo	1	0.012
	Error a	2	0.0093
0-85 cm	Laboreo	1	27.38
	Error a	2	88.66

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad; ^b Media de cuadrados

Tabla XIX. Análisis de la varianza (media de cuadrados) de la biomasa radicular (kg ha^{-1}) del girasol, año 2003-04.

Profundidad	Fuente	GL ^a	MC ^b
0-10 cm	Laboreo	1	2086
	Error a	2	86136
10-20 cm	Laboreo	1	92510
	Error a	2	130809
20-30 a.m.	Laboreo	1	374.2
	Error a	2	10336
30-40 cm	Laboreo	1	9418
	Error a	2	5126
40-55 cm	Laboreo	1	51058
	Error a	2	16965
55-70 cm	Laboreo	1	1250*
	Error a	2	19.27
70-85 cm	Laboreo	1	182
	Error a	2	280.9
0-85 cm	Laboreo	1	207555
	Error a	2	800410

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad; ^b Media de cuadrados

Tabla XX. Análisis de la varianza (media de cuadrados) del N radicular (kg ha^{-1}) del girasol, año 2003-04.

Profundidad	Fuente	GL ^a	MC ^b
0-10 cm	Laboreo	1	1.2145
	Error a	2	13.325
10-20 cm	Laboreo	1	8.3816
	Error a	2	18.369
20-30 a.m.	Laboreo	1	0.6544
	Error a	2	1.4617
30-40 cm	Laboreo	1	3.935
	Error a	2	1.9334
40-55 cm	Laboreo	1	12.426
	Error a	2	10.355
55-70 cm	Laboreo	1	0.259*
	Error a	2	0.0102
70-85 cm	Laboreo	1	0.0679
	Error a	2	0.1168
0-85 cm	Laboreo	1	10.861
	Error a	2	139.9

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad; ^b Media de cuadrados

Tabla XXI. Análisis de la varianza (media de cuadrados) de la concentración de N en la raíz (%) del trigo, girasol, habas y garbanzos. Años 2003-04, 2004-05 y análisis conjunto.

Profundidad	Fuente	GL ^a	Año		GL	Análisis conjunto
			2003-04	2004-05		
Trigo	Año (A)				1	0.1631
	<i>Error a</i>				2	0.1325
	Laboreo (L)	1	0.0615	0.0523	1	0.0005
	A x L				1	0.1067
	<i>Error b</i>	2	0.0984	0.0849	4	0.0864
	Perfil (P)	6	0.6256*	0.0558	6	0.4809**
	A x L				6	0.2298
	L x P	6	0.054	0.0222	6	0.0479
	A x L x P				6	0.032
	<i>Error c</i>	24	0.2417	0.0333	48	0.1403
Girasol	Año (A)					
	<i>Error a</i>					
	Laboreo (L)	1	0.5775			
	A x L					
	<i>Error b</i>	2	0.2826			
	Perfil (P)	6	0.1915**			
	A x L					
	L x P	6	0.0806			
A x L x P						
<i>Error c</i>	24	0.0490				
Habas	Año (A)				1	3.6932
	<i>Error a</i>				2	1.415
	Laboreo (L)	1	0.5614	0.0028	1	0.2976
	A x L				1	0.2643
	<i>Error b</i>	2	0.8381	0.0835	4	0.4493
	Perfil (P)	6	8.306***	0.3583**	6	4.189***
	A x L				6	4.533***
	L x P	6	1.2361**	0.1979*	6	0.4325
	A x L x P				6	1.033***
	<i>Error c</i>	24	0.3286	0.0737	48	0.2069
Garbanzos	Año (A)					
	<i>Error a</i>					
	Laboreo (L)	1	9.2867			
	A x L					
	<i>Error b</i>	2	1.909			
	Perfil (P)	6	1.800***			
	A x L					
	L x P	6	8.982***			
A x L x P						
<i>Error c</i>	24	0.1862				

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^aGrados de libertad

Tabla XXII. Análisis de la varianza (media de cuadrados) del N derivado del aire (NDA), N fijado, N derivado del suelo (NDS) y N aportado por la habas estimado por el método de la abundancia natural. Años 2003-04, 2004-05 y análisis conjunto.

Año	Fuente	GL ^a	NDA (%)	N ₂ Fijado (kg ha ⁻¹)	NDS (kg ha ⁻¹)	N Aportado (kg ha ⁻¹)
2003-04	Laboreo	1	1003.6	130.66	1139.8	1184.4
	Error	2	1241.1	49.162	872.77	872.62
2004-05	Laboreo	1	416			
	Error	3	673.1			
Análisis conjunto	Año (A)	1	15.641			
	Error a	2	211.11			
	Laboreo (L)	1	737.9			
	A x L	1	311.1			
	Error b	4	692.44			

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad

Tabla XXIII. Análisis de la varianza (media de cuadrados) del N derivado del aire (NDA), N fijado, N derivado del suelo (NDS) y N aportado por la habas estimado por el método de la dilución isotópica. Años 2003-04, 2004-05 y análisis conjunto.

Año	Fuente	GL ^a	NDA (%)	N ₂ Fijado (kg ha ⁻¹)	NDS (kg ha ⁻¹)	N Aportado (kg ha ⁻¹)
2003-04	Laboreo	1	2.6667	15.041	10.401	2005.6*
	Error	2	16.551	5.0117	2.6867	44.92
2004-05 ¹	Laboreo					
	Error					
Análisis conjunto ¹	Año (A)					
	Error a					
	Laboreo (L)					
	A x L					
	Error b					

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad

Tabla XXIV. Análisis de la varianza (media de cuadrados) del N derivado del aire (NDA), N fijado, N derivado del suelo (NDS) y N aportado por el garbanzo estimado por el método de la abundancia natural. Años 2003-04, 2004-05 y análisis conjunto.

Año	Fuente	GL ^a	NDA (%)	N ₂ Fijado (kg ha ⁻¹)	NDS (kg ha ⁻¹)	N Aportado (kg ha ⁻¹)
2003-04	Laboreo	1	2491.9			
	Error	2	346.8			
2004-05	Laboreo	1	18.51			
	Error	3	965.07			
Análisis conjunto	Año (A)	1	769.6			
	Error a	2	342.92			
	Laboreo (L)	1	215.9			
	A x L	1	1566.6			
	Error b	4	270.56			

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^aGrados de libertad

Tabla XXV. Análisis de la varianza (media de cuadrados) del N derivado del aire (NDA), N fijado, N derivado del suelo (NDS) y N aportado por la habas estimado por el método de la dilución isotópica. Años 2003-04, 2004-05 y análisis conjunto.

Año	Fuente	GL ^a	NDA (%)	N ₂ Fijado (kg ha ⁻¹)	NDS (kg ha ⁻¹)	N Aportado (kg ha ⁻¹)
2003-04	Laboreo	1	14.106			
	Error	2	21.451			
2004-05	Laboreo	1	43.202			
	Error	2	160.2			
Análisis conjunto	Año (A)	1	1855*			
	Error a	2	63.71			
	Laboreo (L)	1	1.2			
	A x L	1	108			
	Error b	4	95.9			

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^aGrados de libertad

Tabla XXVI. Análisis de la varianza (media de cuadrados) de la proporción de N derivado de la rizodeposición (PNdfr) y N derivado de la rizodeposición (Ndfr) de la habas, año 2003-04.

Fuente	GL ^a	PNdfr (%)	Ndfr (kg ha ⁻¹)
Laboreo(L)	1	0.1422	672.2
<i>Error a</i>	2	15.1839	27793
Profundidad (P)	2	23.481**	26965
L x P	2	1.0972	8364
<i>Error b</i>	8	4.6636	11259

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^aGrados de libertad

Tabla XXVII. Análisis de la varianza (media de cuadrados) de la proporción de N derivado de la rizodeposición (PNdfr) y N derivado de la rizodeposición (Ndfr) de los garbanzos, año 2003-04.

Fuente	GL ^a	PNdfr (%)	Ndfr (kg ha ⁻¹)
Laboreo(L)	1	208.08*	40129
<i>Error a</i>	2	2.94	23941
Profundidad (P)	2	239.11***	650661
L x P	2	97.631***	52340***
<i>Error b</i>	8	2.689	82302

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^aGrados de libertad

Tabla XXVIII. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-3}$) de la longitud radicular (cm cm^{-2}) del trigo, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo							
			6-02-2004	27-02-2004	16-03-2004	24-03-2004	19-04-2004	28-04-2004	13-05-2004	31-05-2004
0-16	S. Laboreo	1	1.74	0.03*	89	9.58	0.89	1.93	0.06	0.62
	Error	1	2.26	0.25	62	9.65	0.25	0.39	0.26	1.26
16-33	S. Laboreo	1	0.003	66.67	6992	25.65	39.33*	31.49	22.46	49.71
	Error	1	0.25	78.3	5398	63	25	65	58.6	56.36
33-49	S. Laboreo	1	0.04	17.98	2733	11.39	14.94	80.23	30.02	163.27
	Error	1	0.48	25	3487	27	42.6	98.1	41.2	356
49-65	S. Laboreo	1	3.41	2.56	2858	50.36	113.63	175.79	136.21	135.15
	Error	1	29.2	18.9	4320	60.2	113.5	450.	358	168.3
65-81	S. Laboreo	1	0.03	22.17	761	10.68	44.21	69.07	57.8	49.85
	Error	1	1.25	36.5	820	16.3	84.2	75.3	59	59.8
81-98	S. Laboreo	1	2.58	38.75	560	17.9	97.56	45.6	80.3	54.6
	Error	1	3.41	38.7	597	18.6	102	47.	96.3	63.2
0-98	S. Laboreo	1	23.02	26.64	22552	258.83	760.6	1338	945.9	1680
	Error	1	39.5	54	9968	587	658	5530	587	6488

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XXIX. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-5}$) de la superficie radicular proyectada ($\text{cm}^2 \text{ cm}^{-2}$) del trigo, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo							
			6-02-2004	27-02-2004	16-03-2004	24-03-2004	19-04-2004	28-04-2004	13-05-2004	31-05-2004
0-16	S. Laboreo	1	0.5763	0.0973	0.00184	1.556	0.0003	0.1235	0.0163	0.0698
	Error	1	1.25	0.36	0.195	1.58	0.587	1.92	1.25	3.6
16-33	S. Laboreo	1	0.0324	0.347	31.94	6.999	14.84*	10.15	7.787	12.11
	Error	1	0.25	12.5	16.4	8.5	7.5	54	28	23
33-49	S. Laboreo	1	0.1083	0.0417	9.2	5.135	2.096	21.58	4.304	39.57
	Error	1	1.26	4.56	22.17	65.3	22.17	45.6	27.6	60.2
49-65	S. Laboreo	1	1.272	0.7933	11.01	20.20	3.71	48.42	31.22	26.44
	Error	1	3.69	0.28	60.2	8.59	3.5	60.2	22.17	58.7
65-81	S. Laboreo	1	0.1081	8.22	3.258	41.4	8.461	14.89	12.46	11.51
	Error	1	4.67	22.17	6.59	60.2	17.59	17.62	60.2	54.2
81-98	S. Laboreo	1	0.0133	0.4147	0.6042	0.00719	0.1198	0.4243	0.1138	2.231
	Error	1	0.32	0.59	9.85	8.37	0.14	9.67	11.37	6.35
0-98	S. Laboreo	1	6.153	10	88	102	198	359	201	382
	Error	1	19.85	18.7	98	153	298	785	362	698

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XXX. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-5}$) de la superficie radicular total ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$) del trigo, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo							
			6-02-2004	27-02-2004	16-03-2004	24-03-2004	19-04-2004	28-04-2004	13-05-2004	31-05-2004
0-16	S. Laboreo	1	5.69	1	0.0181	15.36	0.0038	1.218	0.1615	0.6894
	Error	1	2.56	2.36	1.25	3.36	1.26	1.28	0.19	2.6
16-33	S. Laboreo	1	0.320	343	315	69.07	146*	100	77	120
	Error	1	1.6	698	256	54	23.3	58	59.2	169
33-49	S. Laboreo	1	1.069	41	91	51	20.67	213	42	391
	Error	1	4.59	87.6	98.6	85.2	36.7	420	84	523
49-65	S. Laboreo	1	12.55	8	109	199	303	478	308	261
	Error	1	32.1	6.58	321	265	652	842	293	354
65-81	S. Laboreo	1	1.067	81.18	32	41	84	147	123	151
	Error	1	1.25	658.8	3.7	41.2	98.2	147.3	36.2	185
81-98	S. Laboreo	1	0.1314	4.092	6	0.0709	1.184	4.186	1.125	22.02
	Error	1	0.28	7.86	9.87	0.38	4.58	8.65	1.35	65.3
0-98	S. Laboreo	1	61.0	102	868	1008	1956	3544	1988	3767
	Error	1	36.8	236	958	14566	2639	8541	3655	4566

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XXXI. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-5}$) del diámetro radicular (mm) del trigo, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo							
			6-02-2004	27-02-2004	16-03-2004	24-03-2004	19-04-2004	28-04-2004	13-05-2004	31-05-2004
0-16	S. Laboreo	1	4.552	1.438	1.43	0.1004	0.606	7.063	1.138**	0.0113
	Error	1	5.69	1.58	5.23	1.2	1.6	7.85	0.65	1.48
16-33	S. Laboreo	1	354	0.0473	0.0178	0.5489	2.288	0.774	0.028	0.644
	Error	1	325	1.59	1.58	2.58	3.74	6.32	1.25	6.3
33-49	S. Laboreo	1	43.94	8.752	2.6	0.0059	0.8306	0.1775	0.637	2.719
	Error	1	58.6	5.68	3.24	5.1	0.98	0.98	1.5	2.36
49-65	S. Laboreo	1	370	1.085	3.251	0.3784	0.1032	0.2784	0.0094	0.0345
	Error	1	463	1.25	4.5	7.2	0.26	1.39	1.54	3.36
65-81	S. Laboreo	1	44	1.299	9.63	2.391	1.195	0.0864	0.0061	0.408
	Error	1	33	2.58	3.69	8.54	2.34	4.2	1.3	2.1
81-98	S. Laboreo	1	54	1.285	16.62	6.84	1.544	0.0205	1.431*	0.2832
	Error	1	58.7	1.258	18.6	8.54	1.52	0.58	1.36	0.27
0-98	S. Laboreo	1	1.605	0.749	1.85	0.421	0.0111	0.597	0.2613	1.432
	Error	1	1.36	8.57	1.28	2.5	0.47	1.25	0.36	4.6

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XXXII. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-4}$) del volumen radicular ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-2}$) del trigo, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo							
			6-02-2004	27-02-2004	16-03-2004	24-03-2004	19-04-2004	28-04-2004	13-05-2004	31-05-2004
0-16	S. Laboreo	1	36.4	40.6	13.1	43.4	4.6	0.0722	0.3	1.4
	Error	1	56.3	85.6	54.2	52.3	4.69	1.25	1.36	1.25
16-33	S. Laboreo	1	16.2	3814.9	2827	390.7	1049.8*	650.8	574.6	538.9
	Error	1	36.9	5569	5587	6985	232454	254	455	2052
33-49	S. Laboreo	1	3.5	180.6	443.3	426.8	47.8	1066**	106.4	1528*
	Error	1	3.5	530	612	515	350	5860	456	18952
49-65	S. Laboreo	1	82.1	60.1	652.8	1283.8	1261	2356	1276.6	906.6
	Error	1	96	32.5	3936	252	5166	35216	2645	6336
65-81	S. Laboreo	1	6.2	535.5	239.2	239.2	248.9	533.4	459.2	489.3
	Error	1	9.65	569	569	3658	621	206	336	665
81-98	S. Laboreo	1	0.49	50.3	127.4	8.4	1.6	8.5	0.1	73.3
	Error	1	1.26	56.9	263	5.3	6.5	9.8	1.25	3.69
0-98	S. Laboreo	1	259.7	951.1	5875.2	6761	8836	17637	8192	14868
	Error	1	874	958	899	25858	6025	64511	8552	15832

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XXXIII. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-5}$) de la longitud radicular (cm cm^{-2}) de las habas, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo							
			6-02-2004	27-02-2004	16-03-2004	24-03-2004	19-04-2004	28-04-2004	13-05-2004	31-05-2004
0-16	S. Laboreo	1	3.499	8	13	433	20	51	76	46.97
	Error	1	5.36	8.56	25.	855	62	52	22	53.6
16-33	S. Laboreo	1	50.83	56.5	601	703	1709	1450	343	35.48
	Error	1	69	68	548	252	2526	2548	366	35.3
33-49	S. Laboreo	1	12.94	2.6	806	3165	3494	8783	566	37.35
	Error	1	32	5.6	951	3578	1596	25895	357	357
49-65	S. Laboreo	1	0.1847	0.862	271	519	1387	5751	341	64.94
	Error	1	1.25	2.58	357	951	654	852	654	841
65-81	S. Laboreo	1	56.87	116.1	1244	680	59	5.396	771*	51.41
	Error	1	63.2	225	4585	684	62	8.69	100	65
81-98	S. Laboreo	1	1.464	73.1	847	1672	1957	342	0.0021	0.837
	Error	1	1.25	86.5	954	3852	3584	259	657	254
0-98	S. Laboreo	1	99.66	1042.9	16931	23009	376.56	46953	594	429
	Error	1	331	1205	20185	30225	358	25489	356	245

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XXXIV. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-5}$) de la superficie radicular proyectada ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$) de las habas, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo							
			6-02-2004	27-02-2004	16-03-2004	24-03-2004	19-04-2004	28-04-2004	13-05-2004	31-05-2004
0-16	S. Laboreo	1	0.0147	0.2557	0.0027	1.536	1.681	0.0036	0.324	2.128
	Error	1	0.25	1.25	1.6	3.6	2.5	1.35	2.6	3.6
16-33	S. Laboreo	1	0.9338	9.76	10.63	8.073	12.85	14.36	3.208	0.072
	Error	1	1.26	26.3	15.2	9.3	40.6	15.3	3.7	0.9
33-49	S. Laboreo	1	0.1584	0.5888	10.8	26.33	22.5	69.55	3.554	0.131
	Error	1	5.3	1.26	14.3	56.3	56	85	6.5	12.3
49-65	S. Laboreo	1	0.0167	0.6927	2.202	3.495	6.909	49.05	2.667**	0.213
	Error	1	4.36	9	3.6	4.5	3.58	80	0.6	1.23
65-81	S. Laboreo	1	0.8617	10.11	12.04	5.892	2.201	0.378	3.624*	0.356
	Error	1	2.3	16.3	18.3	5.65	4.36	2.3	6.32	0.36
81-98	S. Laboreo	1	0.0257	8297	9.758	16.35	16.48	2.395	0.0011	0.0007
	Error	1	1.36	2258	9.84	18.3	17.6	6.3	1.2	0.15
0-98	S. Laboreo	1	1.976	12.7	215	227	317	456	7.853	3.936
	Error	1	2.36	5.6	852	225	651	510	5.6	4.5

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XXXV. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-5}$) de la superficie radicular total ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$) de las habas, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo							
			6-02-2004	27-02-2004	16-03-2004	24-03-2004	19-04-2004	28-04-2004	13-05-2004	31-05-2004
0-16	S. Laboreo	1	0.1459	2.523	0.027	15.16	16.6	0.0359	3.199	21.01
	Error	1	1.25	3.69	1.25	16.3	36.5	0.5	1.6	30
16-33	S. Laboreo	1	9.215	96.31	105	79.68	127	142	31.66	0.719
	Error	1	15.3	98.5	150	65.3	231	254	63	0.95
33-49	S. Laboreo	1	1.564	5.81	107	260	222	686	35.07	1.295
	Error	1	1.25	5.99	104	258	236	652	65.3	1.25
49-65	S. Laboreo	1	0.156	6.83	21.72	34.5	68.19	484	26.31**	2.106
	Error	1	0.2	6.35	52.3	54.1	65.6	484	1.36	2.3
65-81	S. Laboreo	1	8.505	99.82	119	58.15	21.73	3.738	35.76*	3.522
	Error	1	6.54	102	142	54	25	3.6	36	5
81-98	S. Laboreo	1	0.2542	81.89	96.3	161	163	23.63	0.011	0.007
	Error	1	0.25	98	97	151	158	47.1	1.2	0.6
0-98	S. Laboreo	1	19.51	125.8	2126	2243	3126	4501	78	38.84
	Error	1	19.5	125	3652	3257	3561	6587	45	38.1

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XXXVI. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-5}$) del diámetro radicular (mm) de las habas, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo							
			6-02-2004	27-02-2004	16-03-2004	24-03-2004	19-04-2004	28-04-2004	13-05-2004	31-05-2004
0-16	S. Laboreo	1	0.3714	0.0039	4.324	9.151	8.762	17.03	7.786	4348
	Error	1	0.25	1.2	3.2	6.2	8.5	15.2	3.6	4562
16-33	S. Laboreo	1	25.07	1.7	4.865	16.1	17.6*	30.18*	17138	226
	Error	1	36.3	2.3	4.25	16.5	16.3	30.5	15522	365
33-49	S. Laboreo	1	0.301	13.91	7.352	31.54	16.39	57.56	16.10	73.78
	Error	1	3.65	13.65	8.25	65.3	16.5	65.4	16.3	75
49-65	S. Laboreo	1	72	0.0131	7.542	6.396	3.203	58.55	43.2	0.034
	Error	1	56	1.2	3.6	6.2	3.5	54.6	62.3	1.35
65-81	S. Laboreo	1	142	0.712	4.211	5.777	95.95*	30.69	1.468	8.741
	Error	1	253	1.3	5.6	6.3	102	36	2.3	3.6
81-98	S. Laboreo	1	483	22.6	321	329	65.78	14.31	176	48.07
	Error	1	556	56	365	364	56	15	158	98
0-98	S. Laboreo	1	152	12.36	24.53	35.42	26.52	19.68	486	176
	Error	1	365	14	52	35	26	15	658	147

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XXXVII. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-3}$) del volumen radicular ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-2}$) de las habas, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo							
			6-02-2004	27-02-2004	16-03-2004	24-03-2004	19-04-2004	28-04-2004	13-05-2004	31-05-2004
0-16	S. Laboreo	1	0.42	14.4	7.41	8.47	57.98	4.44	5.39	281.5
	Error	1	1.25	15.2	3.6	6.3	52	4.2	6.3	265
16-33	S. Laboreo	1	27.37	341.99	364.51	188.53	173.68	246.41	59.73	0.249
	Error	1	65.2	365	365	458	258	236	54	1.2
33-49	S. Laboreo	1	3.55	20.18	248.35	392	271.18	1094.2	43.04*	0.951
	Error	1	2.3	65	548	258	458	6584	25	1.2
49-65	S. Laboreo	1	1.09	7.8	28.24	37.97*	62.03**	794.5	44.88	1.06
	Error	1	3.6	25.	36	34	65	658	74	3
65-81	S. Laboreo	1	21.74	154.02	198.07	85.41	44.58	31.06*	26.81	3.15
	Error	1	22	158	365	84	55	36	32	3.2
81-98	S. Laboreo	1	0.753*	157.37	187.14	279.63	239.02	29.88	4.624	0.009
	Error	1	0.96	558	115	235	335	32	3.5	0.2
0-98	S. Laboreo	1	51.69	2973.2***	4990.31*	3936	4525	8119.6	176.15	307.6
	Error	1	36	218523	26266	5220	6563	6358	155	360

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XXXVIII. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-5}$) de la longitud radicular (cm cm^{-2}) del garbanzo, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo							
			27-02-2004	16-03-2004	24-03-2004	19-04-2004	28-04-2004	5-05-2004	13-05-2004	31-05-2004
0-16	S. Laboreo	1	46.96	1	15.05	790	533	432	294	34.52
	Error	1	5.36	8.56	25	855	62	52	22	53.6
16-33	S. Laboreo	1	0.7084	153**	336	42.88	348	1631**	3339**	641*
	Error	1	1.25	2.58	357	951	654	852	654	841
33-49	S. Laboreo	1	19.98	89153	650	1662	803	49	107	62.25
	Error	1	25	584122	222	652	605	58	211	21
49-65	S. Laboreo	1	71.36	253	49	34	1	687	121	227*
	Error	1	36	254	21	54	0.5	365	214	36
65-81	S. Laboreo	1	0	0.933	6.11	3.914	10.28	2.294	2.248	1.704
	Error	1	0	1.25	3.6	21	25	3	3.6	2.4
81-98	S. Laboreo	1	0	2.416***	2.149***	0	0.025	0	0	0.096***
	Error	1	0	0.25	0.3	0	0.25	0	0	
0-98	S. Laboreo	1	13.81	6	1153	131	237	700	5293	3110*
	Error	1	39.5	54	9968	587	658	5530	587	648

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XXXIX. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-5}$) de la superficie radicular proyectada ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$) del garbanzo, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo							
			27-02-2004	16-03-2004	24-03-2004	19-04-2004	28-04-2004	5-05-2004	13-05-2004	31-05-2004
0-16	S. Laboreo	1	34.45	0.0029	0.00115	3.913**	2.978	1.53	0.953	0.067
	Error	1	1.25	0.36	0.195	1.58	0.587	1.92	1.25	3.6
16-33	S. Laboreo	1	0.0008	2.22	2.855	0.596	1.43	8.176**	15.98**	1.708*
	Error	1	3.69	0.28	60.2	8.59	3.5	0.2	2.17	0.7
33-49	S. Laboreo	1	0.1425	1.122	5.347	11.22	5.352	1.047	0.218	0.0702
	Error	1	2.3	1.2	6.3	15.3	3	2.3	1.2	0.2
49-65	S. Laboreo	1	0.4295	1.518	0.0544	0.044	0.7339	4.584	0.601	0.32*
	Error	1	1.3	1.3	1.2	1.5	0.3	5.3	0.3	1.2
65-81	S. Laboreo	1	0	0.0099	0.0507	0.005	0.105***	0.0063	0.0082	0.0012
	Error	1	0	0.6	1.2	0.02	0.04	0.2	0.3	0.9
81-98	S. Laboreo	1	0	0.02***	0.0175	0	16514	0	0	0.0001***
	Error	1	0	0.01	0.9	0	1256	0	0	0.06
0-98	S. Laboreo	1	0.0788	1.192	15.17	3.464	0.026	0.726	20.93	5.979*
	Error	1	0.25	1.25	15.6	3.2	0.5	0.6	52.3	5.29

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XL. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-5}$) de la superficie radicular total ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$) del garbanzo, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo							
			27-02-2004	16-03-2004	24-03-2004	19-04-2004	28-04-2004	5-05-2004	13-05-2004	31-05-2004
0-16	S. Laboreo	1	3.4	0.0029	0.0113	38.63**	29.4	15.1	9.413	0.668
	Error	1	3.9	0.3	0.5	6.3	36	25	10	0.9
16-33	S. Laboreo	1	0.008	21.96	28.17	5.888	14.12	80.7	158**	16.86*
	Error	1	1.2	3.6	2.5	2.6	17.3	95	152	16.3
33-49	S. Laboreo	1	1.407	11.07	52.78	111	52.82	10.34	2.156	0.693
	Error	1	2.5	23	39	94	85	9	5	6.2
49-65	S. Laboreo	1	4.239	14.99	0.537	0.435	74.42	45.24	5.936	3.167*
	Error	1	9	35	6.	2.3	65	56	5	5
65-81	S. Laboreo	1	0	0.0977	0.501	0.053	0.1039	0.062	0.081	0.011
	Error	1	0	0.25	2.6	0.58	0.65	0.9	0.8	2.
81-98	S. Laboreo	1	0	0.205***	0.173***	0	0.0001	0	0	0.0013***
	Error	1	0	0.069	0.033	0.3	0.6	0	0	
0-98	S. Laboreo	1	0.777	11.77	150	34	0.256	7	207	59.02*
	Error	1	0.5	66	566	51	65	6.3	51	52

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XLI. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-5}$) el diámetro radicular (mm) del garbanzo, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo							
			27-02-2004	16-03-2004	24-03-2004	19-04-2004	28-04-2004	5-05-2004	13-05-2004	31-05-2004
0-16	S. Laboreo	1	20.56	0.1098	17.45	0.171	5.462	5.282	10.21*	5
	Error	1	25	0.5	13.6	2.01	5.61	3.6	0.3	1
16-33	S. Laboreo	1	30.24	24.34	16.16	7.796	1.03	5.985	2.051	97.4
	Error	1	33	61	21	2.6	1.3	6.6	3.9	98
33-49	S. Laboreo	1	23.1	0.234	16.04	16.94	36.59	21.11	1.269	1.008
	Error	1	36	0.36	16.	25	36.9	35	2	3.2
49-65	S. Laboreo	1	78.4	42.53	84	4.947	166*	29.79	0.0031	1.309
	Error	1	35	46	89	5.3	5.6	39	3.8	1.65
65-81	S. Laboreo	1	0	362	136	32	85.56***	46.51	93.03	0.016
	Error	1	0	632	165	5	6.3	17	63	0.8
81-98	S. Laboreo	1	0	861	817	0	16.13	0	0	145***
	Error	1	0	681	65	0	23	0	0	31
0-98	S. Laboreo	1	0.995	36.23	38.44	0.42	8.08	3.181	6.54	11.05
	Error	1	0.36	63	38	1	7.4	6.8	6.7	10

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XLII. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-3}$) del volumen radicular ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-2}$) del garbanzo, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo							
			27-02-2004	16-03-2004	24-03-2004	19-04-2004	28-04-2004	5-05-2004	13-05-2004	31-05-2004
0-16	S. Laboreo	1	4.85	0.61	0.65	39.09**	32.47*	10.06	5.76	0.2907
	Error	1	5.8	0.2	5.6	3.5	31.9	10.6	4.3	6.2
16-33	S. Laboreo	1	0.63	55.3	39.72	10.98	11.26	73.79	136.4***	9.92*
	Error	1	1.5	53	47	10	12	76	23	1.5
33-49	S. Laboreo	1	1.2	25.42	75.43	128.99	77.79	20.26	1	0.1392
	Error	1	1.3	31	87	156	98	21	1	0.1
49-65	S. Laboreo	1	3.58	15.93	0.23	0.01	18.04	53.82	5.34	0.7868*
	Error	1	3.8	18	2.3	1.6	18.7	73.2	9.3	1.5
65-81	S. Laboreo	1	0	16.51	0.71	0.0025	0.017***	4.422	0.0504	0.0011
	Error	1	0	12.3	0.21	1.2	0.2	2.3	0.1	1.2
81-98	S. Laboreo	1	0	30.28***	23.72***	0	0.0002	0	0	0.0003***
	Error	1	0			0		0	0	0.001
0-98	S. Laboreo	1	0.38	69.06	276.5	69.14	15.09	8	157.53	25.01
	Error	1	1.3	63	451	125	23	14	516	26

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XLIII. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-5}$) de la longitud radicular (cm cm^{-2}) del girasol, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo					
			28-04-2004	5-05-2004	20-05-2004	7-06-2004	18-06-2004	29-06-2004
0-16	S. Laboreo	1	176	298	749	103	56	48.6*
	<i>Error</i>	1	266	651	651	616	51	10
16-33	S. Laboreo	1	6497	6606*	1210	0.412	7	139
	<i>Error</i>	1	2965	651	9519	6	5	61
33-49	S. Laboreo	1	7384	3605	1276	12	18	95
	<i>Error</i>	1	5129	6516	516	21	51	61
49-65	S. Laboreo	1	2816	3836	3190	280	1566*	1345
	<i>Error</i>	1	6519	6516	5195	91	651	651
65-81	S. Laboreo	1	15.94	73.24	59.11	1445	235	597
	<i>Error</i>	1	65	51	98	989	65	951
81-98	S. Laboreo	1	0.7008	20.65	1.093	9328	6646	420
	<i>Error</i>	1	6.2	56	9	9519	96519	951
0-98	S. Laboreo	1	56503	545.79	25919	15348	4000	4782
	<i>Error</i>	1	984965	651	95199	95195	95199	66566

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XLIV. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-5}$) de la superficie radicular proyectada ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$) del girasol, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo					
			28-04-2004	5-05-2004	20-05-2004	7-06-2004	18-06-2004	29-06-2004
0-16	S. Laboreo	1	0.242	1.32	2.447	0.2975	0.0614	0.057**
	Error	1	0.565	32	32	1.2	0.6	0.6
16-33	S. Laboreo	1	17.2	20.03*	3.653	0.00003	0.00002	0.1716
	Error	1	59	1.9	3	3.21	3.8	3
33-49	S. Laboreo	1	25.44	12.61	3.122	0.0158	0.0064	0.1981
	Error	1	32	65	3	6.65	0.9	21
49-65	S. Laboreo	1	9.274	12.15	10.03	0.8694	4.017*	2.859
	Error	1	2	51	16	1.3	0.6	21
65-81	S. Laboreo	1	0.0586	0.1598	0.148	2.936	0.222	1.548
	Error	1	23	13	0.15	2	3	89
81-98	S. Laboreo	1	0.0029	0.079	0.0001	21.7	16.95	0.684
	Error	1	2	2	0.8	65	32	98
0-98	S. Laboreo	1	170	178*	77.41	37.31	7.662	10.28
	Error	1	651	23	95	51	32	98

*,**,*** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XLV. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-5}$) de la superficie radicular total ($\text{cm}^2 \text{cm}^{-2}$) del girasol, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo					
			28-04-2004	5-05-2004	20-05-2004	7-06-2004	18-06-2004	29-06-2004
0-16	S. Laboreo	1	2.393	13.03	24.15	2.936	0.6055	0.571**
	<i>Error</i>	1	6	1.3	65	2.03	1.3	0.065
16-33	S. Laboreo	1	171	198*	36.06	0.00003	0.0028	1.694
	<i>Error</i>	1	65	64	65	1.009	3.2	3
33-49	S. Laboreo	1	251	124	30.81	0.1553	0.0641	1.956
	<i>Error</i>	1	654	321	54	6.5	3.21	3
49-65	S. Laboreo	1	92	120	99	8.579	39.64	28.22
	<i>Error</i>	1	65	321	14	9	54	65
65-81	S. Laboreo	1	0.574	1.578	1.462	29	2.190	15.28
	<i>Error</i>	1	5.4	5.3	5.6	65	2	6
81-98	S. Laboreo	1	0.029	0.784	0.0001	214	167	6.749
	<i>Error</i>	1	5	1.4	0.5	965	62	54
0-98	S. Laboreo	1	1677	1758	764	368	76	102*
	<i>Error</i>	1	9551	646	656	566	296	15

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XLVI. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-5}$) el diámetro radicular (mm) del girasol, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo					
			28-04-2004	5-05-2004	20-05-2004	7-06-2004	18-06-2004	29-06-2004
0-16	S. Laboreo	1	4.782*	2.679	0.4344	2.455	0.4448	0.0353
	Error	1	0.65	3	15	5	0.99	0.9
16-33	S. Laboreo	1	43.77	75.1	0.4224	0.2142	1.045	0.0016
	Error	1	98	98	6.5	0.9	3.2	5.1
33-49	S. Laboreo	1	44.31	46	47.25	0.2095	0.1393	1.591*
	Error	1	65	54	59	0.9	5.12	0.06
49-65	S. Laboreo	1	60	49	62.62	0.1024	0.0706	0.394
	Error	1	65	65	36	0.9	0.7	0.9
65-81	S. Laboreo	1	73	24	55.44	1.95	0.0204	1.539
	Error	1	65	98	66	5.3	0.89	1.9
81-98	S. Laboreo	1	101	93.87	9	49.71	57.09	0.0032
	Error	1	98	98	4	65	95	0.07
0-98	S. Laboreo	1	13.61	41.42	19.48	1.699	0.944	0.302**
	Error	1	98	44	55	3	0.9	0.039

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XLVII. Análisis de la varianza (media de cuadrados $\times 10^{-3}$) del volumen radicular ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-2}$) del girasol, año 2003-04.

Profundidad (cm)	Fuente	GL ^a	Fecha de muestreo					
			28-04-2004	5-05-2004	20-05-2004	7-06-2004	18-06-2004	29-06-2004
0-16	S. Laboreo	1	0.4	9.74	15.7	0.58	0.00196	14.28*
	Error	1	0.9	0.3	9.9	0.9	0.84	14
16-33	S. Laboreo	1	79.58	106.47	18.74	0.06	0.23	0.42
	Error	1	66.5	51	51	5.16	6.5	0.7
33-49	S. Laboreo	1	155.04	76.75	13.68	0.9	0.00036	0.72
	Error	1	65	21	32	2	0.2	5.1
49-65	S. Laboreo	1	53.52	71.02	56.57	4.87	19.81	10.77
	Error	1	165	78	96	5	65	51
65-81	S. Laboreo	1	0.39	59.29	0.58	11.41	0.24	6.93
	Error	1	0.9	65	0.9	65.1	0.9	53.3
81-98	S. Laboreo	1	1.980	48.84	0.02	88.74	75.32	1.95
	Error	1	1.98	65	0.9	55	65	65
0-98	S. Laboreo	1	905.16	1029*	416.8	145.35	18.48	40.84
	Error	1	665	6565	655	565	65.1	65

*,**,*** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente. ^a Grados de libertad.

Tabla XLVIII. Análisis de la varianza (media de cuadrados) del N derivado del aire (NDA), N fijado, N derivado del suelo (NDS) y N aportado por la habas estimado por el método de la abundancia natural y enriquecimiento de forma conjunta.

Fuente	GL ^a	NDA (%)	N ₂ Fijado (kg ha ⁻¹)	NDS (kg ha ⁻¹)	N Aportado (kg ha ⁻¹)
Laboreo (L)	1	451	1580*	708	708
<i>Error</i>	2	676	4.01	433	431
Método (M)	1	1545	1677	964	929
L x M	1	554	556	446	486
<i>Error</i>	4	421	709	310	324

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad

Tabla II. Análisis de la varianza (media de cuadrados) del N derivado del aire (NDA) del garbanzo estimado por el método de la abundancia natural y enriquecimiento de forma conjunta. Años 2003-04, 2004-05 y análisis conjunto.

Año	Fuente	GL ^a	NDA (%)
2003-04	Laboreo (L)	1	330
	<i>Error</i>	2	25.6
	Método (M)	1	6156**
	L x M	1	44.8
	<i>Error</i>	4	108
2004-05	Laboreo	1	1010
	<i>Error</i>	2	285
	Método (M)	1	58.2
	L x M	1	505
	<i>Error</i>	4	339
Análisis conjunto	Año (A)	1	117
	<i>Error a</i>	2	113
	Laboreo (L)	1	92
	A x L	1	1248*
	<i>Error b</i>	4	155
	Método (M)	1	3707**
	A x M	1	2507*
	L x M	1	124
	A x L x M	1	425
	<i>Error c</i>	8	253

*, **, *** Significación al 0.05, 0.01 y 0.001 respectivamente.

^a Grados de libertad