



UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

Trabajo Final presentado para optar al Grado de Ingeniero Agrónomo

Modalidad: Proyecto

**INFLUENCIA DE LA DESCOMPACTACION SUBSUPERFICIAL Y
FERTILIZACIÓN FOSFORO-AZUFRADA SOBRE EL SISTEMA
RADICAL, BIOMASA AEREA Y RENDIMIENTO DE SOJA Y MAÍZ.**

Cerliani, Cecilia
D.N.I: 33.328.139

Director: MSc. Ing. Agr. Espósito, Gabriel Pablo.
Co-Director: MSc. Ing. Agr. Cerioni, Guillermo Angel.

Río Cuarto - Córdoba
Noviembre 2011

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA

CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Título del Trabajo Final: **"INFLUENCIA DE LA DESCOMPACTACION
SUBSUPERFICIAL Y FERTILIZACIÓN FOSFORO-AZUFRA DA SOBRE EL
SISTEMA RADICAL, BIOMASA AEREA Y RENDIMIENTO DE SOJA Y MAÍZ"**

Autor: Cerliani Cecilia
DNI: 33.328.139

Director: MSc Ing Agr. Espósito, Gabriel Pablo.
Co-Director: MSc Ing Agr. Cerioni, Guillermo Angel.

Aprobado y corregido de acuerdo con las sugerencias de la Comisión Evaluadora:

MSc. Ing. Agr. Espósito, Gabriel Pablo

Ing Agr. Cholaky, Carmen

Ing. Agr. Plevich, Omar

Fecha de Presentación: ____/____/____.

Secretario Académico

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, principalmente a mis padres y abuelos por su apoyo incondicional a lo largo de la carrera y la vida.

A Diego por haberme acompañado durante todos estos años.

A los ingenieros Gabriel Espósito y Guillermo Cerioni, por aceptar dirigir este trabajo, por su apoyo y dedicación.

A todos los profesores de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Nacional de Río Cuarto, en especial a Federico Morla, Guillermo Balboa, Oscar Giayetto y Carlos Catillo, por su aporte y aliento en este y otros proyectos.

A los Ingenieros Ricardo Balboa y Jorge Boheler, que me asesoraron y dedicaron su valioso tiempo para que me salieran las cosas de la mejor manera.

A mis amigos Jorgelina, Laura, Natalí, Matías y Franco que a lo largo de este camino siempre estuvieron presentes.

INDICE GENERAL

| | |
|---|-------------|
| RESUMEN | VIII |
| SUMMARY | IX |
| I-INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1-Hipotesis | 7 |
| 2-Objetivo Específico | 7 |
| 3-Objetivo General | 7 |
| II-MATERIALES Y MÉTODOS | 8 |
| 1- Descripción del ensayo experimental | 8 |
| 2-Observaciones y Mediciones | 10 |
| A-Del Clima | 10 |
| B-Del Suelo..... | 10 |
| Humedad de Suelo | 10 |
| C-Del Cultivo | 11 |
| Materia seca total de raíces | 11 |
| Materia seca total aerea | 12 |
| Rendimiento y sus componentes | 13 |
| 3-Analisis de datos | 13 |
| III-RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 14 |
| 1-Descripción meteorológica de las campañas agrícolas 2009/10 y 2010/11 en “Pozo del Carril” | 14 |
| 2-Contenido de agua en el perfil del suelo | 15 |
| 3-Materia seca total de raíces | 17 |
| 4-Materia seca total de la parte aerea | 20 |
| 5-Rendimiento y sus componentes | 24 |
| 6-Relación entre rendimiento y tasa de crecimiento del cultivo (TCC) | 30 |
| 7-Relación entre rendimiento y biomasa de raíces | 31 |
| IV-CONCLUSIONES | 34 |
| V- BIBLIOGRAFIA | 35 |
| ANEXO I | 42 |
| ANEXO II | 45 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Temperatura media del aire durante los meses de septiembre a mayo de los ciclos 2009/10 y 2010/11 y la media del período 1993/2009. | 14 |
| Figura 2. Precipitaciones decádicas (mm), durante los meses de agosto a mayo de los ciclos 2009/10 (soja) y 2010/11 (maíz) y la media del período 1993/2009. | 15 |
| Figura 3. Porcentaje (%) de agua útil disponible (barras) acumulada en el perfil del suelo hasta el metro de profundidad, para los tratamientos descompactado y sin descompactar, en el cultivo de soja al momento de la siembra. Línea=100, 100% de la capacidad de agua útil del suelo | 16 |
| Figura 4. Porcentaje (%) de agua útil disponible (barras) acumulada en el perfil del suelo desde los 60 cm hasta el metro de profundidad, para los tratamientos descompactado y sin descompactar, en el cultivo de soja al momento de la siembra. Línea=100, 100% de la capacidad de agua útil del suelo | 16 |
| Figura 5. Porcentaje (%) de agua útil disponible (barras) acumulada en el perfil del suelo hasta el metro de profundidad, para los tratamientos descompactado y sin descompactar, en el cultivo de maíz al momento de la siembra. Línea=100, 100% de la capacidad de agua útil del suelo..... | 17 |
| Figura 6. Porcentaje (%) de agua útil disponible (barras) acumulada en el perfil del suelo desde los 60 cm hasta el metro de profundidad, para los tratamientos descompactado y sin descompactar, en el cultivo de maíz al momento de la siembra. Línea=100, 100% de la capacidad de agua útil del suelo | 17 |
| Figura 7. Biomasa aérea de maíz en V6 (g MS m ⁻²) en función de la descompactación y la fertilización fosforo- azufrada. | 22 |
| Figura 8. Biomasa aérea de maíz en V14 (g MS m ⁻²) en función de la descompactación y fertilización fosforo-azufrada Observaciones y Mediciones | 23 |
| Figura 9. Número de granos m ⁻² de maíz en función de la fertilización, para los tratamientos descompactado y sin descompactar | 26 |
| Figura 10. Peso de 1000 granos de maíz (g) en función de la fertilización, para los tratamientos descompactado y sin descompactar | 27 |
| Figura 11. Rendimiento de maíz (Kg ha ⁻¹) en función del número de granos m ⁻² | 28 |
| Figura 12. Rendimiento de maíz (Kg ha ⁻¹) en función del peso 1000 granos m ⁻² | 28 |
| Figura 13. Número de granos m ⁻² en función del peso de 1000 granos (g) de maíz en los tratamientos fertilizados y sin fertilizar | 29 |

| | |
|--|-----------|
| Figura 14. Rendimiento del cultivo (Kg Ha^{-1}) en función de la TCC ($\text{gMs m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) entre V14 y R2..... | 30 |
| Figura 15. Rendimiento del cultivo (Kg ha^{-1}) en función de materia seca de raíces ($\mu\text{g cm}^{-3}$), en una profundidad de 0-0,2 m, para los tratamientos fertilizados y no fertilizados..... | 31 |
| Figura 16. Rendimiento del cultivo (Kg ha^{-1}) en función de materia seca de raíces ($\mu\text{g cm}^{-3}$), en una profundidad de 0,2-0,4 m, para los tratamientos fertilizados y sin fertilizar | 31 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|-----------|
| Tabla 1. Descripción del perfil del suelo..... | 9 |
| Tabla 2. Biomasa de raíces de soja ($\mu\text{g cm}^{-3}$), en distintos estadios fenológicos y a distintas profundidades (0,2 m en V2 y 0,2-0,4 m en R3) en función de la descompactación y fertilización fosforo- azufrada | 18 |
| Tabla 3. Biomasa de raíces de maíz ($\mu\text{g cm}^{-3}$) a distintas profundidades (0-0,2 y 0,2-0,4 m), en función de la descompactación y fertilización | 19 |
| Tabla 4. Biomasa de raíces de maíz ($\mu\text{g.cm}^{-3}$) para distintos tratamientos, en una profundidad de 0 a 0,2 metros | 19 |
| Tabla 5. Biomasa aérea (g MS m^{-2}) de soja, en el estadio fenológico V2 en función de la descompactación y fertilización fosforo-azufrada..... | 21 |
| Tabla 6. Biomasa aérea (g MS m^{-2}) y tasa de crecimiento del cultivo (TCC) ($\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) de maíz V14-R2, en distintos estadios fenológicos en función de la descompactación y fertilización fosforo- azufrada | 22 |
| Tabla 7. Rendimiento (Kg ha^{-1}), y sus componentes: número de granos (granos m^{-2}) y peso de 1000 granos (g) de maíz, en función de la descompactación y fertilización fosforo- azufrada | 25 |

RESUMEN

En los últimos años se ha producido en la Argentina una expansión del área de soja y maíz, hacia zonas con alta susceptibilidad a la degradación por compactación. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la descompactación conjuntamente con la fertilización acumulada fósforo-azufrada sobre el crecimiento del sistema radical y el rendimiento de soja y maíz. Se realizó un estudio en el departamento de Río Cuarto, durante dos ciclos agrícolas 2009/10 (soja) y 2010/11 (maíz). El diseño experimental fue en bloques completamente aleatorizados con arreglo factorial 2x2, los factores fueron fertilización y descompactación (con y sin en ambos) con 2 repeticiones. Se cuantificó biomasa aérea de soja (V2) y de maíz (V6, V14 y R2). Se midió la biomasa de raíces en soja durante V2 (0,2 m) y R3 (0,4 m) y en maíz V6 (0,4 m). Se evaluó el rendimiento y sus componentes directos (número y peso de granos). La biomasa aérea y de raíces de soja en V2, no fue afectada por los factores estudiados; en R3 fue modificada por la fertilización entre 0-20 cm, mientras que en 20-40 cm la descompactación y fertilización tuvieron efectos aditivos. En maíz la biomasa aérea durante los estadios vegetativos fue afectada por la interacción de los factores, mientras que en R2 ambos la afectaron de manera aditiva. La biomasa de raíces fue alterada en los primeros 20 cm por la fertilización, mientras que en 20-40 cm, los factores actuaron de manera interactiva, registrándose mayores valores de biomasa en aquel tratamiento que fue descompactado y fertilizado. Si bien los componentes directos del rendimiento de maíz fueron afectados por la interacción de los factores en estudio, el rendimiento solo fue alterado por la fertilización, no encontrándose relación entre la biomasa de raíces y el rendimiento.

Palabras Claves: Descompactación – Fertilización – Raíces – Rendimiento

SUMMARY

In recent years there has been an expansion in Argentina's soybean and maize area, to areas with high susceptibility to degradation by compaction. This study was to evaluate the effect of ripping (deep tillage) in conjunction with the phosphorus-sulfur accumulated fertilization on root growth and soybean and maize yield. A study were carried in the department of Río Cuarto, for two crop seasons 2009/10 (soybean) and 2010/11 (maize). The experimental design was completely randomized with factorial arrangement 2x2, the factors were fertilization and ripping (with and without both) with 2 replicates. We quantified biomass of soybean (V2) and corn (V6, V14 and R2). Root biomass was measured in V2 (0,2 m) and R3 (0,4 m) for soybean and V6 in corn (0,4 m). We evaluated the direct yield and its components (number and weight of grains). Root biomass in V2 soybean was not affected the factors studied, in R3 was modified by fertilization between 0-0,2 m, and while the ripping and fertilization had additive effects between 0,2-0,4 m. Maize biomass during vegetative stage was affected by factors interaction, while in R2 affect both the additive. Root biomass was altered in the first 0,2 m by fertilization, while in 0,2-0,4 m, the factors acting interactively, recorded higher values of biomass at the treatment that was ripping and fertilized. While the direct components of maize yield were affected by the interaction of the factors under study, the yield was only altered by fertilization. We not found relationship between root biomass and yield.

Key Words: Ripping – Fertilization – Root – Crop yield

INTRODUCCIÓN

Desde 1980 la región agrícola más fértil del territorio nacional, la denominada pampa húmeda, presenta una fuerte erosión del suelo. Según el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), alrededor de la mitad de los 5 millones de hectáreas son afectadas por el influjo de un notable proceso de erosión que ocasiona la caída de los rendimientos de estas tierras en, por lo menos, un tercio (SAGyP, 1995). En la provincia de Córdoba el 11% de la superficie esta afectada por procesos de erosión hídrica (categorizada en tres niveles, ligera, moderada y grave 6, 3 y 2%, , respectivamente) y un 6% por erosión eólica (3% ligera y 3% moderada), mientras que en el departamento de Río Cuarto, estos porcentajes se incrementan al 42,6% de erosión hídrica (16,4; 14,8 y 11,4% ligera, moderada y grave, respectivamente) y 14,2% eólica (5,6 ligera, 4,8 moderada y 3,8% grave) (Gorgas y Tassile, 2006).

Para tratar de solucionar este problema, los agricultores empezaron a experimentar con el sistema de “labranza cero”, consistente en la siembra directa de semillas en la tierra sin necesidad de arar ni practicar ninguna otra forma de labranza.

Esta técnica fue acompañada a partir de los años 90 con la siembra de materiales de soja transgénica tolerantes a glifosato, lo que facilitó la notable expansión del área bajo cultivo con esta oleaginosa, debido a que parecía la solución a los problemas que enfrentaban. La adopción de estas alternativas tecnológicas, simplificaron y abarataron el control de malezas y la implantación del cultivo. Además, gracias a la siembra directa, se incorporaron al proceso productivo áreas en las que la utilización de labranzas convencionales agravaban los procesos de erosión (Boccardi y Boccardi, 2007).

En el Dpto. Río Cuarto predominó la actividad ganadera hasta mediados del siglo XX, donde se incorpora la agricultura invernal (trigo, lino, avena y centeno), posteriormente se incorporó el maíz que paulatinamente desplazó los cultivos invernales y en los años 70 comienza a introducirse la soja (Cantú, 1998). Actualmente los principales cultivos agrícolas que se realizan en esta región son soja y maíz, con una superficie sembrada de 586 y 110 mil ha, respectivamente. A nivel provincial se observa la misma tendencia con 5,05 y 1,14 millones de ha, la cual se repite a nivel nacional con 18,8 millones de ha de soja y 4,5 millones de ha de maíz (SIIA, 2011).

El aumento de la superficie cultivada producido en las últimas décadas, a través de la incorporación de áreas marginales a la producción agropecuaria, llevó a una intensificación de la agricultura, la cual se torna cada vez más insustentable, debido a la degradación del ambiente que incluye problemas de erosión, pérdida de fertilidad y estructura del suelo, salinización,

exportación de nutrientes, alcalinización, encostramiento, impactos sobre la biodiversidad, afectación del acuífero, y problemas de inundaciones (Boccardi y Boccardi, 2007).

Esta degradación puede explicarse, entre otras razones, por la baja restitución de materia orgánica de los cultivos estivales, que acompañada con el incremento en el tamaño y peso de las maquinarias provoca alteraciones de las condiciones físicas (Bricchi, 1996; Cisneros *et al.*, 1997, Degioanni, 1998) y biológicas de los suelos (Moreno *et al.*, 1996).

Dentro de los procesos de degradación producidos se encuentra la densificación subsuperficial, que se define como “el proceso por el cual las partículas del suelo sufren un re arreglo, aumentando el contacto entre sí, disminuyendo el espacio poroso e incrementando la densidad aparente” (SSSAJ, 2008).

Las densificaciones pueden deberse a distintas causas, distinguiéndose las naturales de las antrópicas. Dentro de las primeras se encuentra la compresión natural de las partículas del suelo durante los procesos de formación de los mismos, o la contracción causada por los procesos de humedecimiento-secado del suelo, las cuales se producen sin la intervención del hombre en el ecosistema. La naturaleza geológica del suelo caracteriza sus propiedades físicas y mecánicas, las cuales influyen en su compresibilidad y compactibilidad, que dependen de textura, estructura, contenido de materia orgánica y humedad del suelo. De las de origen antrópico, pueden citarse el pisoteo de animales, el tránsito de maquinarias y la acción del agua en esquemas de riego por aspersión o inundación (Alakukku, *et al.*, 2003).

El tráfico de la maquinaria agrícola es la principal causa de compactación del suelo, ya que posee carácter acumulativo (Keller, 2004). Durante la aplicación de estas cargas las partículas del suelo son reorganizadas, decrece el espacio poroso y éstas son llevadas a un contacto más cercano, incrementando la densidad, la forma, tamaño y distribución de los poros, lo cual limita la capacidad de retención de agua en el suelo, el intercambio hídrico y gaseoso, y aumenta la impedancia mecánica (Berli, 2001; Gysi, *et al.*, 2001). Este efecto de compactación ejercido por los rodados de las maquinarias depende de la fuerza mecánica del suelo, que es influenciada por la textura y la materia orgánica (MO) (Larson *et al.*, 1980) y de la humedad edáfica (Mosaddeghi *et al.*, 2000). A su vez, numerosos trabajos indican que las propiedades físicas del suelo son menos alteradas al disminuir el número de pasadas (Seker y Isildar, 2000).

Como se mencionó anteriormente, el contenido de humedad edáfico es el factor más importante que influencia estos procesos (Soane y Van Ouwerkerk, 1994). Para todos los niveles de compactación, la resistencia a la penetración aumenta a medida que disminuye el potencial agua del suelo (Lipiec *et al.*, 2002). En general, no se recomienda ejercer ningún tipo de presión sobre el suelo cuando el mismo se encuentra húmedo. Así, Weber *et al.* (2000) reportaron que en

suelos con bajo contenido de humedad, la siembra directa (SD) no tuvo influencias en la densidad aparente a 30 cm de profundidad. En concordancia con lo anterior, Medvedev y Cybulko (1995) indicaron que ante un bajo contenido de humedad en el suelo, incluso con altas cargas, éste no se deformó más de 2 cm en profundidad, mientras que con un alto contenido de humedad, el valor de carga permisible (la carga que no causa una compactación significativa) fue apreciablemente menor.

Los principales factores que afectan al crecimiento de las raíces son el contenido hídrico y la resistencia a la penetración del suelo. Ambos están relacionados entre sí, para un mismo grado de compactación la resistencia que ofrece el suelo a la penetración de raíces disminuye al aumentar su contenido hídrico y viceversa. En condiciones de secano es muy importante que las raíces encuentren condiciones favorables para crecer en profundidad de manera que puedan extraer la mayor cantidad de agua acumulada en el suelo (Andrade y Sadras, 2002).

Así, la presencia de capas densificadas disminuye la velocidad de elongación de las raíces, provoca alteraciones en su morfología, modificando el sistema de conducción de agua y nutrientes hacia la parte aérea, repercutiendo en la misma. Estas alteraciones conllevan a la disminución de los rendimientos de los cultivos agrícolas, mayores requerimientos energéticos en labranzas y labores culturales, necesidades de resiembras, mayores dosis de agroquímicos y número de pasadas de los equipos, necesidades crecientes de fertilizantes e ineficiencia en el uso de la maquinaria (Botta, 2002).

La habilidad de las raíces de las plantas para penetrar se ve restringida en suelos cuya resistencia a la penetración es mayor a 2,5 kPa (Taylor, 1971). En general, las plantas que crecen bajo suelos compactados poseen menor cantidad de raíces secundarias y menor materia seca radicular total que las que crecen sin impedancias mecánicas (Panayiotopoulos *et al.*, 1994; Bingham *et al.*, 2010).

Numerosos trabajos describen reducciones en el crecimiento radical, al aumentar la resistencia a la penetración del suelo, así Rosolem *et al.* (1994) encontraron reducciones del 50% del crecimiento radicular de soja en suelos que presentaban resistencia a la penetración de 0,69 MPa, mientras que en maíz se alcanzó dicha reducción con una resistencia de 1,42 MPa.

En Corrientes (Argentina) Giardinieri *et al.* (2004), midieron reducciones de un 30% en el peso seco de raíces de soja y maíz, con densidades de suelo de 1,5 Mg m⁻³, respecto densidades de 1,3 Mg m⁻³. Al aumentar la densidad a 1,70 Mg m⁻³, la reducción del crecimiento radical en soja alcanzó el 56,76% y en maíz el 45,83%, observándose además una curvatura de la raíz en el caso de la soja.

En un estudio realizado sobre un suelo Fluventic Ustropept, con cultivo de maíz, se observó un mayor peso seco de raíces en los primeros 12 cm de perfil donde se presentaba una capa restrictiva, seguido luego por una marcada disminución a mayor profundidad. En el mismo se indicó que la biomasa radical, así como también la longitud y la densidad radical disminuyó en los tratamientos donde la densidad aparente era superior (Nuñez y Bisbal, 1999).

Por otro lado es bien conocida la relación entre el crecimiento radical y el aéreo, explicado principalmente en términos de la capacidad de las raíces para brindar el sostén y tomar agua y nutrientes (Sadras y Calviño, 2001), y de un complejo sistema de señales inhibitorias enviadas por las mismas hacia las hojas cuando éstas están creciendo en suelos fisiológicamente inhospitables (Passioura, 2002).

Existen algunas prácticas que pueden utilizarse una vez que se ha producido una degradación en la estructura del suelo. Algunas de ellas son adicionar o favorecer la acumulación de MO, controlar el tráfico, utilizar algún tipo de labranza vertical profunda y seleccionar una adecuada rotación de cultivos (Nuernberg *et al.*, 1986, citado por Giardinieri *et al.*, 2004).

La descompactación, por medio de distintos implementos descompactadores, puede ser una importante práctica para contribuir a solucionar los problemas de compactación (Jarvis *et al.*, 1986). Su utilización se ha difundido mucho en situaciones de compactación subsuperficial con el fin de favorecer la infiltración del agua y el crecimiento radical (Bateman y Chanasyk, 2001). Sadras *et al.* (2005) describen un efecto positivo sobre el crecimiento del cultivo remanente de por lo menos dos ciclos posteriores a la labor de descompactación.

El descompactador efectúa una remoción sub-superficial del terreno y fragmenta sectores masificados del suelo, reconstituyendo el espacio poroso, mejorando la infiltración y la exploración de las raíces. Los arcos rectos a su vez, tienen la virtud de mantener la cobertura del suelo y, si están bien diseñados, no desemparejan el terreno permitiendo así continuar con la implantación de cultivos en siembra directa en forma ininterrumpida (Ferraris, 2007).

Numerosos trabajos han reportado aumentos en los rendimientos de los cultivos luego de efectuar una labranza vertical profunda a suelos compactados y generalmente esto es atribuido al mayor crecimiento radical (Clark y Humpreys, 1996). La descompactación profunda y uniforme, permite lograr un mayor enraizamiento otorgando al cultivo mayor resistencia a la sequía, mejor aprovechamiento de los nutrientes y estímulo de la actividad microbiana (Passioura, 2002). Todo ello es posible gracias a la mejor estructura y fertilidad del suelo, redundando en mayor rendimiento, a tal efecto, Sadras *et al.* (2005) describen que la descompactación del suelo aumenta marcadamente la eficiencia de interceptación de la radiación y

la transpiración del cultivo, sin afectar la eficiencia transpiratoria ni la eficiencia en el uso de la radiación.

Otro proceso degradativo del suelo, causado por la intensificación de la agricultura, es la pérdida de fertilidad (Boccardi y Boccardi, 2007). La región pampeana ha sufrido un progresivo deterioro en la fertilidad de sus suelos a lo largo de su historia agrícola. Para los rendimientos obtenidos, y de acuerdo con la extracción realizada por los cultivos de grano (García, 2000), el balance de nutrientes del suelo en términos físicos y económicos ha sido y es claramente negativo.

El balance negativo adquiere singular importancia en el caso del fósforo (P), ya que prácticamente la fertilización es su única vía de entrada al sistema suelo-planta (Vázquez, 2002). Adicionalmente, es un nutriente de elevada residualidad (Berardo, 2003), y baja eficiencia de recuperación cuando es agregado vía fertilización (Gutiérrez Boem *et al.*, 2002).

El fósforo es un macronutriente, debido a la cantidad en que es requerido y por la frecuencia con que se encuentra en cantidades deficientes para los cultivos (Marschner, 1995). La fertilización fosforada permite un mejor desarrollo de raíces e incrementa la habilidad para extraer agua (García *et al.*, 1998).

Por otro lado, plantas con deficiencias de fósforo presentan menor expansión del área foliar y un menor número de hojas, aunque la fotosíntesis es afectada en menor medida (Mollier y Pellerin, 1999). Otros procesos fisiológicos como la nodulación en leguminosas se ve disminuida en suelos pobres en fósforo debido a la alta demanda de este nutriente por parte de los nódulos (Cassman *et al.*, 1980).

Así, una deficiencia de fósforo causa disminuciones en el rendimiento debido a su efecto sobre la formación de área foliar y, por lo tanto sobre la cantidad de radiación capturada, y también por su efecto sobre la eficiencia de conversión de radiación en materia seca; la suma de estos provoca, en soja, un menor crecimiento entre floración y comienzo de llenado de granos, menos número de granos y, por lo tanto, un menor rendimiento (Botta *et al.*, 2002).

Diversos trabajos realizados en el establecimiento “Pozo del Carril”, ubicado en cercanías del paraje La Aguada, departamento Río Cuarto, demostraron respuesta altamente significativa del cultivo de soja a la fertilización fosforada, explicado mayormente por el aumento en los componentes directos del rendimiento, principalmente número de granos, como así también aumentos en la producción de materia seca aérea (Costantino, 2005; Oviedo, 2005; Lubrina, 2008).

El cultivo de maíz, mostró similar comportamiento al de soja, aumentando el rendimiento y producción de materia seca en respuesta a la fertilización fosforo-nitrogenada,

explicado por una mayor tasa de crecimiento del cultivo durante el periodo crítico (V13-R3) (Pérez, 2009; Viano, 2010). Otros trabajos demuestran los efectos positivos de la fertilización fosfatada sobre el rendimiento de los cultivos como alfalfa (Berardo y Marino, 2000) y trigo (Berardo *et al.*, 1999; Garcia *et al.*, 1998).

Bingham *et al.* (2010), estudiaron la interacción entre prácticas de descompactación y fertilización nitrogenada sobre el crecimiento de raíces de cebada, describiendo el efecto positivo de estas prácticas de manejo sobre la producción de biomasa de raíces y aérea.

Así, tanto la descompactación como la fertilización permiten que los cultivos puedan generar un sistema radical capaz de captar eficientemente los recursos, generando una mejor condición de crecimiento y desarrollo (Andrade y Sadras, 2002) que se traduce en mayores rendimientos (Carcova *et al.*, 2003). Este rendimiento en granos es la resultante de dos componentes principales, el número de ellos por unidad de superficie y su peso, ambos responden a cambios en las condiciones ambientales y fisiológicas del cultivo de maíz (Andrade *et al.*, 1996) y soja (Andrade y Sadras, 2002).

De acuerdo a lo mencionado en párrafos anteriores, cabe suponer que al realizar una labranza vertical que elimine las capas subsuperficiales densificadas, complementado por la aplicación de fósforo y azufre, se favorece el desarrollo del sistema radical, produciendo mejoras en la capacidad de absorción de agua y nutrientes, lo que influye directamente sobre los procesos del crecimiento de la biomasa aérea, aumentando así el rendimiento.

HIPÓTESIS

La eliminación de capas subsuperficiales densificadas a través del uso de un descompactador, junto a la fertilización acumulada fósforo-azufrada, permite un mejor desarrollo del sistema radical y aéreo mejorando el rendimiento de los cultivos de soja y maíz.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de la descompactación en forma conjunta con la fertilización acumulada fósforo- azufrada sobre el desarrollo del sistema radical, el rendimiento y sus componentes en el cultivo de soja y maíz.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Cuantificar la biomasa radical en los cultivos de soja y maíz, en respuesta a las prácticas de descompactación subsuperficial y fertilización fosforo-azufrada.
- Evaluar el rendimiento del cultivo de maíz y las principales variables que lo definen, número y peso de granos, biomasa aérea, tasa de crecimiento del cultivo, en función a las prácticas de manejo antes mencionadas.
- Establecer la relación entre la biomasa radical, la tasa de crecimiento y los componentes directos del rendimiento (número y peso de granos) con la producción de granos en el cultivo de maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

DESCRIPCION DEL ENSAYO EXPERIMENTAL

El presente trabajo se realizó durante las campañas 2009/10 (soja) y 2010/11 (maíz) en el campo de experimentación y docencia de la Universidad Nacional de Río Cuarto “Pozo del Carril” (32°58'20"LS; 64°39'19" LW y 640 msnm), ubicado en el paraje La Aguada, departamento Río Cuarto, Córdoba.

El clima es templado subhúmedo, con régimen monzónico y una precipitación media anual de 850 mm. El balance hídrico presenta un déficit de entre 50 y 300 mm año⁻¹ de acuerdo al régimen de lluvias. Las sequías, heladas extemporáneas, granizo y la intensidad de las precipitaciones constituyen las principales adversidades climáticas (Degioanni, 1998).

El relieve en la zona donde se ubica el ensayo se caracteriza por ser muy complejo de moderado a fuertemente ondulado determinando un conjunto de lomadas, cuya longitud oscila entre los 3.000 y 6.000 m de largo con un gradiente del 2 al 3 % (Becker, 2001). Los suelos se desarrollaron sobre materiales loésicos, franco arenosos muy finos de la Formación La Invernada (Cantú, 1992).

En el área bajo estudio, el relieve es normal, suavemente ondulado, con pendientes de longitudes largas y gradientes promedios de 1,5 % (Esposito, 2002). El suelo es un Hapludol típico (Tabla 1), de textura franca arenosa muy fina, lo que significa que aproximadamente 80 % de partículas son de tamaño limo y arena muy fina en el horizonte A (Bricchi, 1996). Además, este suelo presenta susceptibilidad a la desagregación superficial y compactación, siendo sus principales limitantes, la erosión hídrica y eólica (Degioanni, 1998).

Tabla 1. Descripción del perfil del suelo donde se desarrollo la experiencia, CAM.DOC.EX “Pozo del Carril”. UNRC. (32°58’20’’LS; 64°39’19’’LW)

| Horizonte | A | Bw1 | Bw2 | BC | C |
|-------------------------|------|-------|-------|-------|-----|
| Profundidad (cm) | 0-30 | 30-43 | 43-60 | 60-74 | +74 |
| Materia Orgánica (%) | 1,58 | 0,89 | 0,69 | 0,3 | - |
| Arcilla < 2 μ (%) | 15 | 12 | 8 | 6 | 6 |
| Limo 2-50 μ (%) | 40,5 | 37 | 40 | 37 | 35 |
| Arena 50-1000 μ (%) | 45 | 51 | 50 | 55 | 58 |
| pH | 6,8 | 7 | 7,1 | 7,2 | 7,5 |

Fuente: Esposito, 2002.

Descripción estructural del perfil

- A: Bloques subangulares, medios, moderados. Límite inferior claro, suave.
- Bw1: Bloques subangulares, gruesos, moderados a débiles. Límite inferior claro suave.
- Bw2: Bloques subangulares, gruesos y medios, débiles a moderados. Límite inferior gradual suave.
- BC: Bloque angulares, medios, débiles. Límite inferior gradual suave.
- C: Apedal. Límite inferior gradual suave.

En el sitio experimental se realiza desde el año 1994 el Programa de "Desarrollo de alternativas tecnológicas sustentables para el oeste de Río Cuarto", razón por la cual los tratamientos de fertilización presentan un efecto acumulado de 16-17 años. El valor inicial de fósforo en el año 1994 era de 7 ppm (Esposito, 2007), llegando en el año 2006 con valores de 19,3 ppm (\pm 3,37 ppm) para las franjas fertilizadas y 6,3 ppm (\pm 0,47 ppm) para las franjas no fertilizadas (Lubrina, 2008).

El diseño experimental se realizó en bloques completamente aleatorizados con arreglo factorial 2 x 2; los factores fueron dos, fertilización y descompactación (con y sin en ambos) con 2 repeticiones. El tamaño de las parcelas fue de 70 m de largo y 35 m de ancho (2450 m²).

Los tratamientos de descompactación se realizaron el 24 de noviembre de 2009 y el 3 de junio de 2010, mediante el uso de descompactador desarrollado por la UNRC (Cisneros *et al.*, 1998), con una profundidad de trabajo de 25-30 cm.

La fertilización se efectuó con una mezcla de 100 kg ha⁻¹ de Superfosfato Simple (0-23-0-12-20) y 40 kg ha⁻¹ Sulfato de calcio (18-0-0-0-21), en la primer campaña, para soja; y con 130 kg ha⁻¹ de Fosfato de Amonio Azufrado (14-14,8-0-08), en el ciclo agrícola 2010/11,

realizándose una refertilización con UREA (46-0-0-0) (130 kg ha⁻¹) al estado de seis hojas completamente desplegadas de maíz (V6).

La implantación para ambos casos se efectuó con una sembradora neumática de nueve surcos en siembra directa. La siembra de soja se realizó el 19 de diciembre de 2009, con una densidad de 30 semillas m⁻¹ a 0,35 m entre surcos, utilizando la variedad NA4910. El 28 de octubre de 2010, se sembró el híbrido de maíz MGR2 La tijereta LT622, con una densidad de 7,1 semillas m⁻² a 0,7 m entre surcos.

OBSERVACIONES Y MEDICIONES

Del Clima:

Durante los ciclos de los cultivos se registraron la temperatura del aire media diaria y las precipitaciones mediante la estación agrometeorológica LI-COR 1200 Minimun, perteneciente a la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la UNRC, ubicada en el campo experimental “Pozo del Carril” en cercanías del ensayo.

Del Suelo

Humedad del suelo

Se midió el contenido de agua del suelo a la siembra para los dos cultivos. Para ello se utilizó el método gravimétrico con 3 muestras de 0 a 20, 20 a 40, 40 a 60, 60 a 80 y de 80 a 100 cm de profundidad para cada tratamiento.

Las muestras se pesaron húmedas, se secaron en estufa a una temperatura de 105° C hasta peso constante y se volvieron a pesar. La diferencia entre el peso de la muestra húmeda y la seca es la cantidad de agua que, relacionada (mediante las siguientes ecuaciones) con el peso seco del suelo, representa el contenido de humedad en el momento de muestreo (ecuaciones I, II y III). Los datos de densidad aparente, empleados para la transformación realizada en este estudio de la humedad gravimétrica a volumétrica fueron tomados del trabajo de Gómez (2011).

$$CGA = \frac{(PH + T) - (PS + T)}{PS - T} \quad [I]$$

Donde:

CGA: contenido gravimétrico de agua (g g⁻¹)

PH: peso de la muestra de suelo húmedo (g)

PS: peso de la muestra de suelo seco (g)

T: tara del recipiente de aluminio (g)

$$HV = CGA \cdot DAP \quad [II]$$

Donde:

HV: humedad volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)

CGA: contenido gravimétrico de agua (g g^{-1})

DAP: densidad aparente (g cm^{-3}) (Gomez, 2011).

$$LA = HV \cdot E \quad [III]$$

Donde:

LA: lámina de agua (mm)

HV: humedad volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)

E: espesor de la muestra (mm)

Luego se calculó el valor de agua útil disponible a través de la siguiente ecuación:

$$AUD = LA - PMP \quad [IV]$$

Donde:

AUD= agua útil disponible (mm)

LA= lamina de agua (mm)

PMP = punto marchitez permanente (mm) (Gómez, 2011).

Del Cultivo

Materia seca total de raíces:

Durante el cultivo de soja, se evaluó el peso seco de raíces tomando 3 muestras de raíces en dos estadios fenológicos: V2 y R3, según la escala fenológica Fehr y Caviness (1977), por cada tratamiento y repetición. Las muestras fueron tomadas con un cilindro de metal de 0,19 m de diámetro, hasta una profundidad de 0,2 m ($0,00567 \text{ m}^3$) en V2 y hasta 0,4 m en R3 (0-20 y 20-40 cm). Las mismas se colocaron en agua durante unos minutos, para facilitar el lavado

posterior, que se realizó con agua a presión y tamices de apertura de malla de 500 μm para separar las raíces de las partículas de suelo. Luego se secaron a estufa de circulación de aire forzada a 55 °C, hasta peso constante y se pesaron.

En el cultivo de maíz se evaluó el peso seco de raíces en el estadio fenológico V8 (Ritchie y Hanway, 1997). En este caso se extrajeron 5 muestras por tratamiento utilizando un cilindro de metal de 0,10 m de diámetro, hasta una profundidad de 0,2 m (0,0015 m^3) y luego de 0,2 m hasta los 0,4 m. Posteriormente se realizó el mismo proceso que en el cultivo de soja.

Materia seca total aérea

En el estadio V2 del cultivo de soja (Fehr y Caviness, 1977) se estimó la producción de materia seca aérea, mediante secado en estufa a 80°C hasta peso constante, de 3 muestras compuestas por 3 plantas cada una, por tratamiento y repetición. Solo se realizó esta medición en V2, ya que en el estadio fenológico R3 el cultivo sufrió daños totales por la caída de granizo en la zona del ensayo.

En el cultivo de maíz se cuantificó la biomasa aérea en los estadios V6, V14, y R2 (Ritchie y Hanway, 1997). En V6 se extrajeron 5 muestras por parcela, constituidas por 5 plantas de maíz (1 m lineal) cada una. Posteriormente se secaron en estufa a 80°C hasta peso constante. En los estadios V14 y R2, la medición se realizó pesando la biomasa aérea verde de cada muestra en campo, tomando una alícuota de 1 planta por muestra, que posteriormente fue secada en estufa a 80°C hasta peso constante para establecer el contenido de humedad del material verde. Finalmente, se afectó el peso de la muestra verde (a campo) por este coeficiente, obteniéndose así la materia seca total.

Se calculó la tasa de crecimiento del cultivo durante el periodo V14-R2, en los distintos tratamientos mediante la ecuación V:

$$TCC (g m^{-2} día^{-1}) = \frac{MS R2 - MS V14}{DP} \quad [V]$$

Donde TCC es la tasa de crecimiento del cultivo; MS V14 es la materia seca (g m^{-2}) en el estadio V14; MSR2 es materia seca (g m^{-2}) en R2; y DP es la duración en días del periodo comprendido entre V14 y R2. Cabe aclarar que en este periodo, se determina el número de granos por unidad de superficie, principal componente del rendimiento de maíz (Andrade *et al.*, 1996)

Rendimiento y sus componentes:

Se determinó únicamente en el cultivo de maíz debido a que, como se comentó anteriormente, el cultivo de soja sufrió daño total por caída de granizo (aproximadamente en R3).

La cuantificación de la producción de granos se realizó mediante cosecha mecánica, con una cosechadora de parcelas marca Wintersteiger de dos surcos y pesadas con tolva báscula, cosechando los cuatro surcos centrales de cada tratamiento. Una vez realizada la cosecha, se recolectó una muestra de cada parcela para luego determinar el contenido de humedad y el peso de mil granos. También se midió el número de plantas por unidad de superficie al momento de la cosecha, mediante recuento manual. Además se determinó el número de granos por unidad de superficie (m^2) mediante la ecuación VI:

$$N^{\circ} \text{ granos } m^{-2} = \frac{\text{Rendimiento (kg } m^{-2}) \text{ } 1000}{\text{Peso de 1000 granos (kg)}} \quad \text{[VI]}$$

ANÁLISIS DE LOS DATOS

Los datos fueron analizados mediante ANAVA y test de comparación de medias a través del test LSD Fisher con un 5% de probabilidad.

Los datos de producción de biomasa de raíces fueron transformados, ya que no cumplen con los supuestos de homocedasticidad, lo cual fue verificado gráficamente y mediante el test de Levene (ANEXO I, Figuras 17, 18, 19, 20, 21), mediante la siguiente ecuación (VII):

$$X' = \sqrt{X + 1} \quad \text{[VII]}$$

Donde X es el dato original y X' el transformado.

Además, se analizaron las relaciones entre variables medidas mediante el análisis de regresión lineal. Para ello se utilizó el programa estadístico INFOSAT versión 2011 (Di Rienzo *et al.*, 2011).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción meteorológica de las campañas agrícolas 2009/10 y 2010/11 en “Pozo del Carril”

Durante la estación de crecimiento de los cultivos (septiembre a mayo) correspondiente a los ciclos agrícolas 2009/10 (soja) y 2010/11 (maíz) la temperatura media diaria y las precipitaciones ocurridas, son las indicadas en las figuras 1 y 2, respectivamente.

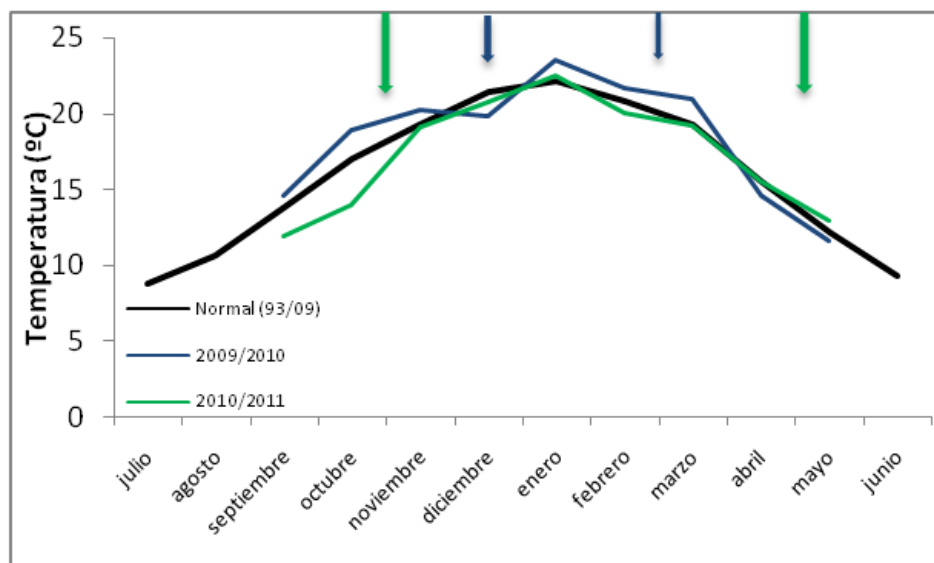


Figura 1. Temperatura media del aire durante los meses de septiembre a mayo de los ciclos 2009/10 y 2010/11 y la media del período 1993/2009. Flechas indican el periodo de siembra y fin del cultivo por granizo para soja (azul) y cosecha de maíz (verde).

La temperatura media del ciclo 2009/10 (Figura 1) fue, en promedio, superior a la media histórica en los meses del ciclo productivo de la soja (meses de diciembre, enero y febrero), mientras que en la campaña 2010/11, las temperaturas medias fueron menores a la normal en la primer parte del ciclo del maíz y similares a la media desde enero en adelante.

Las precipitaciones decádicas registradas para los meses de agosto a mayo fueron, en general, significativamente inferiores a la media (Figura 2). Así, las lluvias acumuladas para el ciclo agrícola 2009/10 fue un 47% y para el ciclo 2010/11 un 21% menor (402 y 599 mm vs 762 mm, respectivamente) que la normal registrada en el sitio experimental.

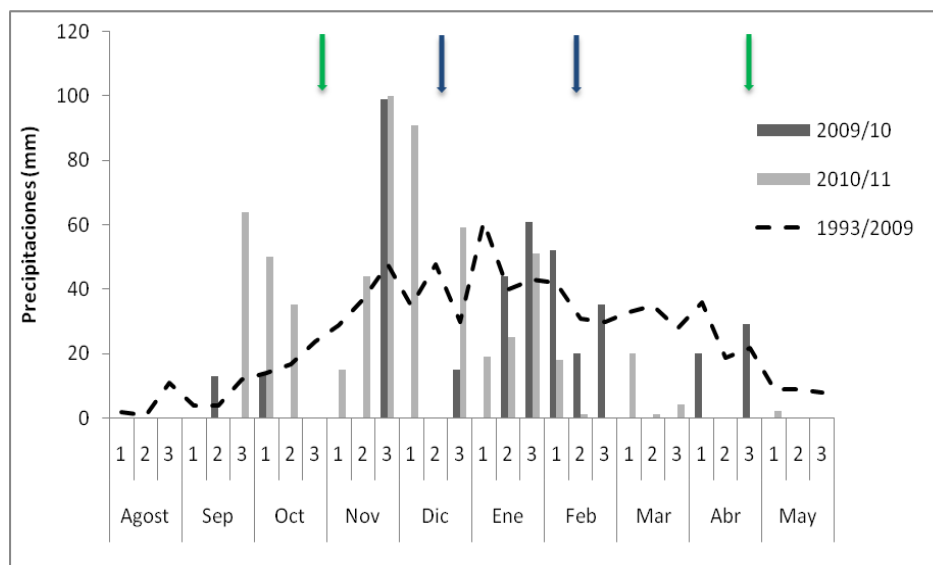


Figura 2. Precipitaciones decádicas (mm), durante los meses de agosto a mayo de los ciclos 2009/10 (soja) y 2010/11 (maíz) y la media del período 1993/2009. Flechas indican el periodo de siembra y fin de cultivo por granizo, para soja (azul) y cosecha de maíz (verde).

Contenido de Agua en el perfil del suelo

En las Figuras 3 y 5, se presenta el agua disponible acumulada en un metro de profundidad al momento de la siembra expresado como porcentaje del agua útil del suelo. En ambas figuras se puede observar que la disponibilidad hídrica al momento de la siembra de soja y maíz fue superior a la capacidad de retención del suelo, por lo tanto se entiende que en las primeras capas de suelo contenían agua en percolación hacia las capas inferiores (como consecuencias de las últimas precipitaciones ocurridas antes del muestreo, Figura 2).

Al realizar este análisis en las capas inferiores a los 60 cm se observa una similar tendencia en el cultivo de soja (mayor disponibilidad que la capacidad de retención, Figura 4), mientras que en maíz el agua disponible fue un 45 y 33% inferior al agua útil.

Como se puede apreciar en las Figuras 3 y 5, el contenido hídrico acumulado fue siempre superior en el suelo donde se realizaron las labores de descompactación para los dos ciclos agrícolas. Estas diferencias observadas entre los tratamientos, pueden ser debidas a cambios en la tasa de infiltración y en la redistribución del agua en el perfil del suelo causadas principalmente por el cambio en las condiciones de porosidad en el suelo como consecuencia de su descompactación (Passioura, 2002; Sadras *et al.*, 2005).

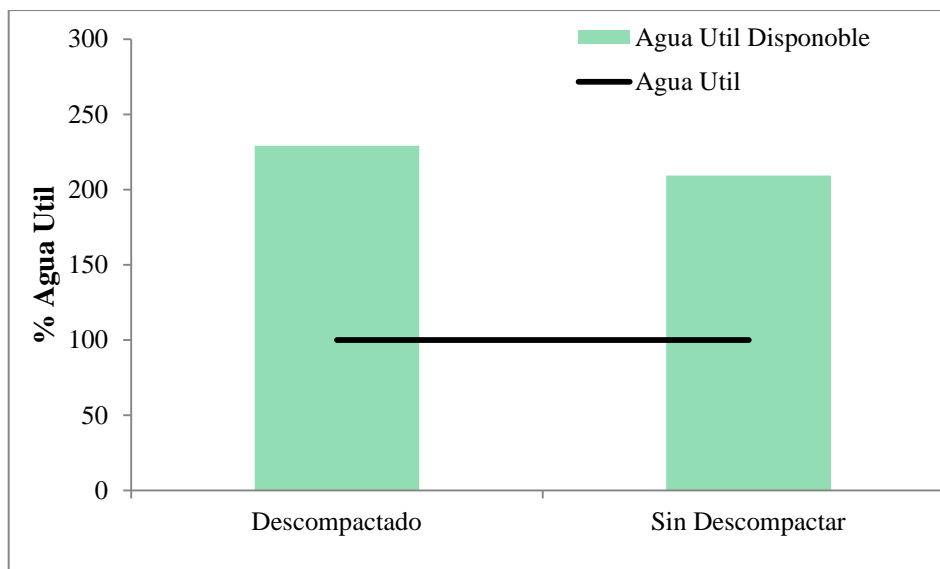


Figura 3. Porcentaje (%) de agua útil disponible (barras) acumulada en el perfil del suelo hasta el metro de profundidad, para los tratamientos descompactado y sin descompactar, en el cultivo de soja al momento de la siembra. Línea=100, 100% de la capacidad de agua útil del suelo.

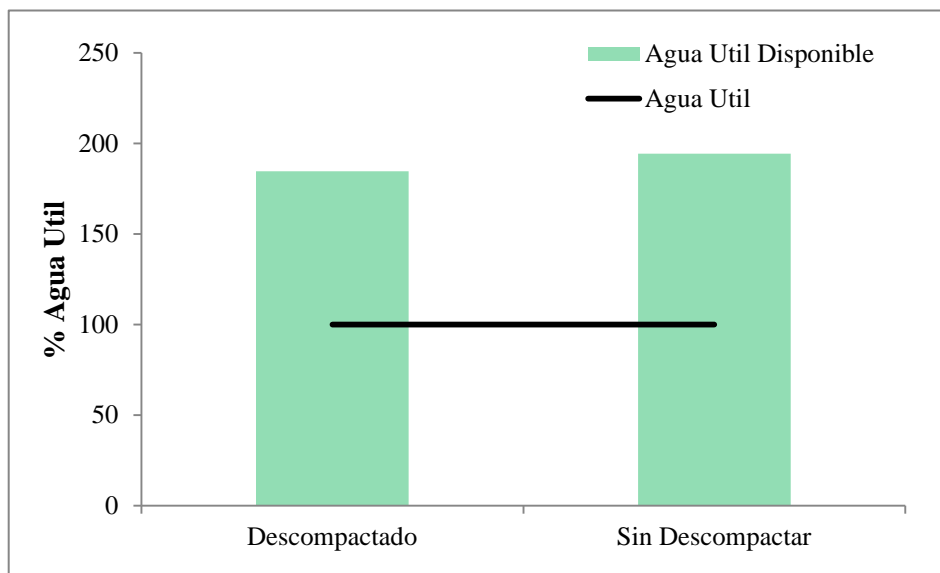


Figura 4. Porcentaje (%) de agua útil disponible (barras) acumulada en el perfil del suelo desde los 60 cm hasta el metro de profundidad, para los tratamientos descompactado y sin descompactar, en el cultivo de soja al momento de la siembra. Línea=100, 100% de la capacidad de agua útil del suelo.

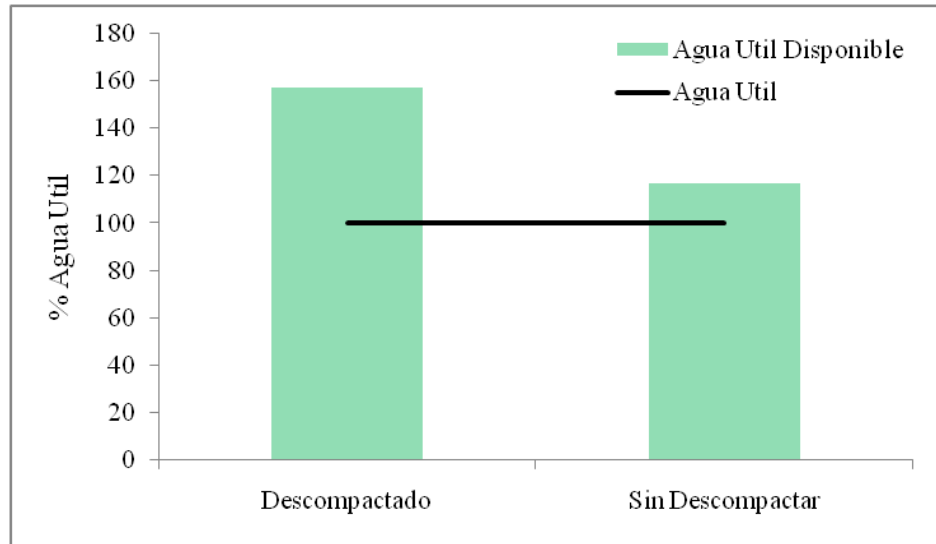


Figura 5. Porcentaje (%) de agua útil disponible (barras) acumulada en el perfil del suelo hasta el metro de profundidad, para los tratamientos descompactado y sin descompactar, en el cultivo de maíz al momento de la siembra. Línea=100, 100% de la capacidad de agua útil del suelo.

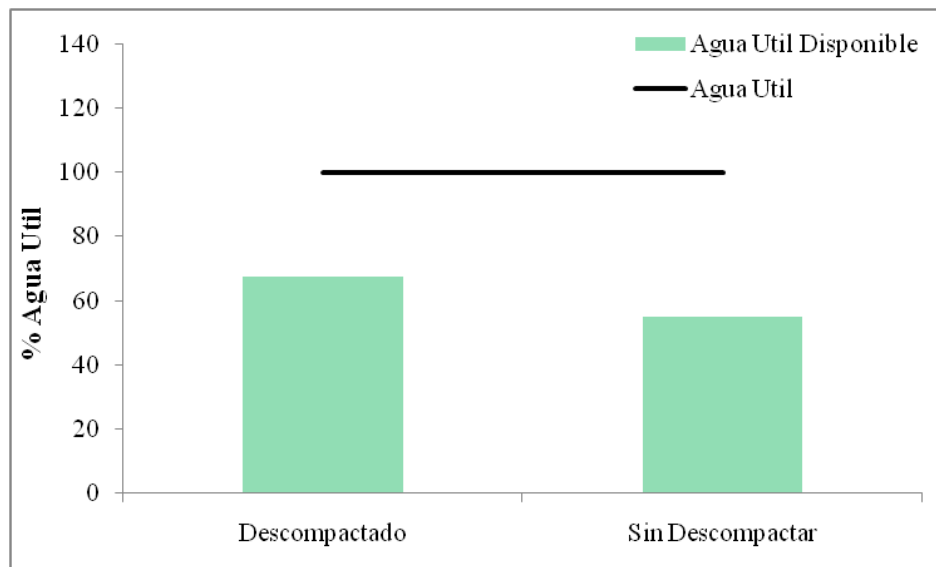


Figura 6. Porcentaje (%) de agua útil disponible (barras) acumulada en el perfil del suelo desde los 60 cm hasta el metro de profundidad, para los tratamientos descompactado y sin descompactar, en el cultivo de maíz al momento de la siembra. Línea=100, 100% de la capacidad de agua útil del suelo.

Materia seca total de raíces

Para las condiciones dadas durante el período de estudio, la producción de raíces en el cultivo de soja, medida a través del peso seco de las mismas, no fue afectada estadísticamente durante el estadio V2 por ninguno de los factores estudiados (Tabla 2), tampoco se encontró interacción entre ellos.

En relación a la biomasa de raíces en R3, sólo se encontraron efectos estadísticos significativos entre los tratamientos de fertilización, en los primeros 20 centímetros de suelo. En este caso el tratamiento fertilizado registró un 74% más de peso seco de raíces que los tratamientos no fertilizados. A mayor profundidad del perfil, entre los 20 y 40 cm, los factores descompactación y fertilización tuvieron un efecto aditivo. La cantidad de raíces en el tratamiento descompactado fue 58% superior respecto al sin descompactar; por su parte la fertilización produjo un aumento del 100% de raíces.

Giardinieri *et al.* (2004) en un estudio en el cual se evaluó el peso seco de raíces del cultivo de soja a distintas profundidades en el perfil del suelo, creciendo en tres densidades (1,3; 1,5; y 1,7 Mg m⁻³), no encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los distintos tratamientos, observándose una tendencia de aumento en el peso seco a mayor profundidad en el tratamiento con la menor densidad (1,3 Mg m⁻³), mientras que en la densidad 1,7 Mg m⁻³ el peso seco de raíces en superficie fue mayor. Además, estos autores observaron una curvatura en la raíz al crecer en suelos con la mayor densidad (1,7 Mg m⁻³), la misma curvatura fue observada en el presente estudio en los tratamientos no descompactados (ANEXO II, Fotografía 12).

Tabla 2. Biomasa de raíces de soja ($\mu\text{g cm}^{-3}$), en distintos estadios fenológicos y a distintas profundidades (0,2 m en V2 y 0,2-0,4 m en R3) en función de la descompactación y fertilización fosforo-azufrada.

| Fenología | | V2 | | R3 | |
|----------------------------|-----|----------|--------|-------------|--|
| | | 0-0,20 m | | 0,20-0,40 m | |
| Descompactado | Con | 0,1 | 0,45 | 0,019 a | |
| | Sin | 0,09 | 0,39 | 0,012 b | |
| | DMS | 0,026 | 0,152 | 0,006 | |
| Fertilizado | Con | 0,10 | 0,54 a | 0,02 a | |
| | Sin | 0,10 | 0,31 b | 0,01 b | |
| | DMS | 0,026 | 0,152 | 0,006 | |
| ANAVA | | | | | |
| Descompactación (D) | | ns | ns | † | |
| Fertilización (F) | | ns | † | †† | |
| F*D | | ns | ns | ns | |
| C.V. | | 5,82 | 15,11 | 1,95 | |

Datos transformados por raíz de X+1, en tabla se presentan valores originales. CV de los datos originales 34,89; 40,99 y 48,28, para el peso seco de raíces en V2 de 0-0,2 m de profundidad, en R2 de 0-0,2 m y de 0,2-0,4 m, respectivamente. ††† $p < 0,001$; †† $p < 0,01$; † $p < 0,05$; ns: no significativo (LSD Fisher). Medias con letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$). F*D, interacción fertilización por descompactación.

En el peso seco de raíces de maíz (Tabla 3), se encontró interacción significativa entre la descompactación y fertilización ($p = 0,034$) en los 20 cm superficiales del perfil del suelo. En la profundidad de 20 a 40 cm de suelo se observó efecto de la descompactación, registrándose mayor biomasa de raíces en el tratamiento descompactado ($0,044 \mu\text{g cm}^{-3}$). Este último, mostró diferencias estadísticamente significativas con respecto al no descompactado ($0,025 \mu\text{g cm}^{-3}$). Por su parte la fertilización no mostró efectos significativos ($p = 0,4825$).

Tabla 3. Biomasa de raíces de maíz ($\mu\text{g cm}^{-3}$) a distintas profundidades (0-0,2 y 0,2-0,4 m), en función de la descompactación y fertilización.

| Profundidad | | 0-0,2 | 0,2-0,4 |
|--------------------------|-----|-------|---------|
| Descompactado | Con | 0,019 | 0,044 a |
| | Sin | 0,089 | 0,025 b |
| DMS | | 0,034 | 0,016 |
| Fertilizado | Con | 0,083 | 0,032 a |
| | Sin | 0,032 | 0,038 a |
| DMS | | 0,034 | 0,016 |
| ANAVA | | | |
| Descompactado (D) | | ††† | † |
| Fertilizado (F) | | †† | ns |
| F*D | | † | ns |
| C.V. | | 3,68 | 1,83 |

Datos transformados por raíz de $x+1$, en tabla se presentan valores originales. CV de los datos originales 94,99 y 71,37, para el peso seco de raíces en V8 de 0-0,2 m y de 0,2-0,4 m, respectivamente. ††† $p < 0,001$; †† $p < 0,01$; † $p < 0,05$; NS no significativo (LSD Fisher). Medias con letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$). F*D, interacción fertilización por descompactación.

En la Tabla 4, se presenta el análisis de la interacción entre la descompactación y la fertilización. La biomasa de raíces en el tratamiento fertilizado y sin descompactar, fue superior y estadísticamente significativa con los tratamientos restantes, los cuales no difirieron entre sí.

Tabla 4. Biomasa de raíces de maíz ($\mu\text{g.cm}^{-3}$) para distintos tratamientos, en una profundidad de 0 a 0,2 metros.

| Profundidad | 0-0,2m |
|---------------------------------|---------|
| Sin Descompactar –Fertilizado | 0,134 a |
| Sin descompactar-Sin Fertilizar | 0,045 b |
| Descompactado-Fertilizado | 0,025 b |
| Descompactado-Sin Fertilizar | 0,019 b |

Medias con letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$).

Estos resultados coinciden con los hallados por Giardinieri *et al.* (2004), los cuales encontraron para distintas densidades de suelo y profundidades, una tendencia de mayor peso seco en la zona superficial de suelo al aumentar la densidad, atribuyendo esto al hecho que en la mayor densidad las raíces no pueden atravesar capas más compactadas y se concentran en la parte superior del perfil del suelo. En este sentido cabe destacar lo propuesto por Andrade *et al.* (2002), que describen que la producción de un sistema radical denso y profundo es muy importante, debido a que este es el encargado de captar eficientemente el agua y los nutrientes para el crecimiento y desarrollo de la planta. Un sistema con estas características le permite al cultivo expresar completamente su potencial genético, ya que el sistema aéreo puede desarrollarse y fotosintetizar a la máxima tasa posible (Nuñez y Bisbal, 1999). Finalmente, Sadras *et al.* (2005) mencionan que la descompactación provoca un aumento en la transpiración y en la eficiencia de intercepción de la radiación asociada a un mayor crecimiento aéreo del cultivo.

Materia seca total de la parte aérea

Las mediciones realizadas en el cultivo de soja, indican que la producción de biomasa aérea medida en el estadio fenológico V2 (dos hojas verdaderas completamente desplegadas) (Fehr y Caviness, 1977), no fue afectada estadísticamente por la fertilización ($p=0,21$), la descompactación ($p=0,20$), ni por la interacción entre ambos factores ($p=0,17$). Sin embargo, se observó una tendencia a producir una mayor biomasa en los tratamientos con descompactación y con fertilización (Tabla 5). Es factible que esta mayor producción de biomasa se atribuya a un mejor crecimiento radical que posibilita una mayor absorción de agua y nutrientes (Passioura, 2002; Giardinieri *et al.*, 2004). Además, Costantino (2005), encontró los mismos resultados en el establecimiento “Pozo del Carril”, comparando tratamientos fertilizados y sin fertilizar, donde se observó un efecto positivo de la fertilización, sin detectar diferencias estadísticas durante los primeros 40 días después de siembra, momento en el cual la diferencia entre tratamientos comenzó a ser significativa.

Tabla 5. Biomasa aérea (g MS m⁻²) de soja, en el estadio fenológico V2 en función de la descompactación y fertilización fosforo-azufrada.

| Fenología | | V2 |
|--------------------------|-----|-------|
| Descompactado | Con | 88,21 |
| | Sin | 71,41 |
| DMS | | 26,78 |
| Fertilizado | Con | 88,21 |
| | Sin | 71,78 |
| DMS | | 26,78 |
| ANAVA | | |
| Descompactado (D) | | ns |
| Fertilizado (F) | | ns |
| F*D | | ns |
| C.V. | | 39.14 |

††† $p < 0,001$; †† $p < 0,01$; † $p < 0,05$; ns, no significativo (LSD Fisher). Medias con letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$). F*D, interacción fertilización por descompactación.

La producción de biomasa aérea total de maíz, mostró diferencias entre tratamientos, en los distintos estadios fenológicos evaluados (Tabla 6).

En el estadio V6 se observó interacción significativa entre la descompactación y la fertilización ($p < 0,0001$), con una producción superior en el tratamiento descompactado y fertilizado, seguido por el tratamiento fertilizado y sin descompactar, mientras que en los tratamientos no fertilizados la producción de biomasa aérea no difirió estadísticamente entre los tratamientos de descompactación (Figura 7).

Viano (2010), en concordancia con lo observado en este estudio, encontró diferencias significativas en la producción de biomasa total aérea, entre tratamientos fertilizados y sin fertilizar para el periodo comprendido entre siembra y V6. Similares resultados fueron descritos por Pérez (2009) en el mismo sitio experimental del presente estudio.

Tabla 6. Biomasa aérea (g MS m^{-2}) y tasa de crecimiento del cultivo (TCC) ($\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$) de maíz V14-R2, en distintos estadios fenológicos en función de la descompactación y fertilización fosforo-azufrada.

| | | V6 | V14 | R2 | TCC V14-R2 |
|----------------------------|-----|------|-------|----------|------------|
| Descompactación | Con | 58,6 | 557,1 | 1604,5 a | 43,9 a |
| | Sin | 41,5 | 580,8 | 1444,0 b | 36,4 a |
| DMS | | 7,3 | 128,9 | 141 | 14,9 |
| Fertilización | Con | 69,3 | 591,4 | 1745,7 a | 48,7 a |
| | Sin | 30,8 | 546,5 | 1302,7 b | 31,6 b |
| DMS | | 7,3 | 128,9 | 141 | 14,9 |
| ANAVA | | | | | |
| Descompactación (D) | | ††† | Ns | † | Ns |
| Fertilización (F) | | ††† | Ns | ††† | † |
| F*D | | ††† | †† | ns | Ns |
| C.V. | | 22,5 | 31,2 | 12,7 | 16,4 |

††† $p < 0,001$; †† $p < 0,01$; † $p < 0,05$; ns, no significativo (LSD Fisher). Medias con letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$). F*D, interacción fertilización por descompactación.

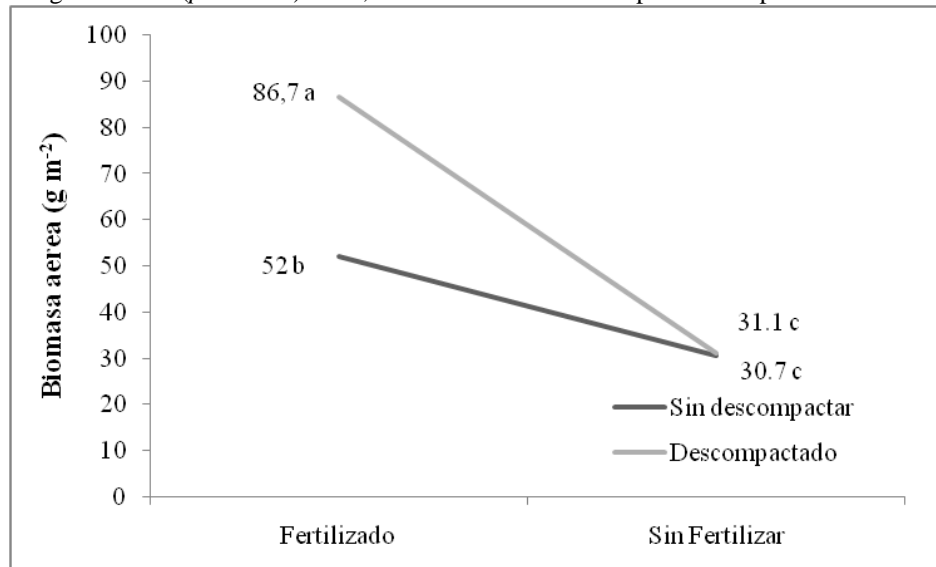


Figura 7. Biomasa aérea de maíz en V6 (gMS m^{-2}) en función de la descompactación y la fertilización fosforo-azufrada. En figura, letras distintas indican diferencias significativas LSD-Fisher ($p \leq 0,05$).

En el estadio V14 también se manifestó el efecto interactivo entre los factores descompactación y fertilización (Figura 8). En este caso, la mayor producción se correspondió con el tratamiento descompactado y fertilizado (similaramente a lo encontrado en V6). Esta combinación no presentó diferencias estadísticas con el tratamiento sin fertilizar y sin descompactar y ambos difirieron con el tratamiento sin descompactar y fertilizado y el

descompactado sin fertilizar. Según los resultados obtenidos en este estudio, se puede apreciar que en el estadio V14 solo es conveniente descompactar, si se fertiliza en forma conjunta.

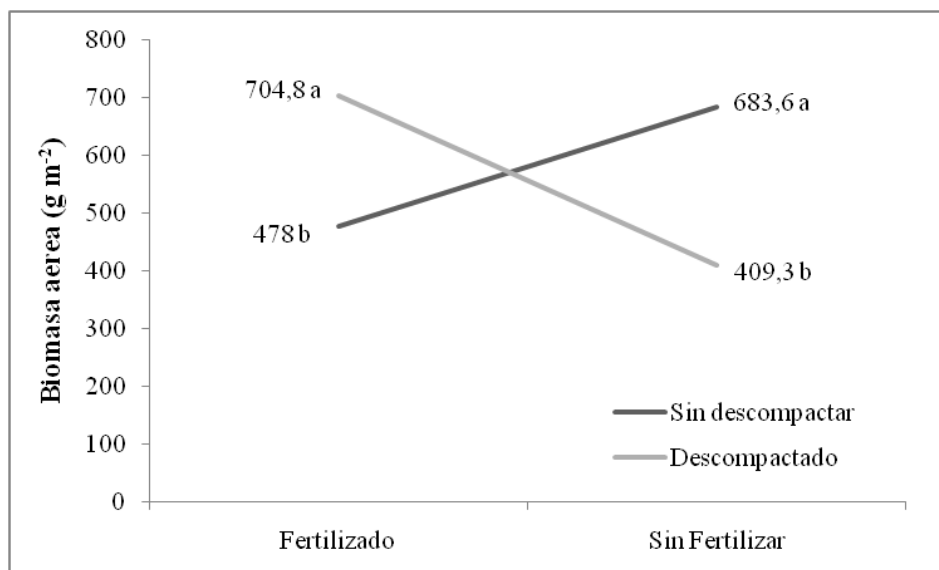


Figura 8. Biomasa aérea de maíz en V14 (gMS m⁻²) en función de la descompactación y fertilización fosforo-azufrada. En figura, letras distintas indican diferencias significativas LSD-Fisher ($p \leq 0,05$).

En el estadio fenológico R2, se encontraron efectos aditivos entre los factores analizados, dado que las diferencias fueron estadísticamente significativas entre los tratamientos de fertilización ($p < 0,0001$) y entre los de descompactación ($p = 0,0274$), sin interacción entre ellos ($p = 0,56$). En este caso la mayor producción de biomasa aérea correspondió al tratamiento descompactado, que produjo un 11% más y el tratamiento fertilizado mostró un aumento del 34% en la biomasa aérea.

Contrariamente a los resultados obtenidos por este estudio y los de Pérez (2009), Viano (2010), no encontró diferencias en la producción de materia seca aérea en el estadio comprendido entre V13 y R1 y entre R1 y R3. Mientras que, estudios realizados por Giardinieri *et al.*, (2004), demostraron que el peso seco foliar no difirió estadísticamente, entre plantas que crecieron bajo distintas densidades de suelo.

Esta mayor producción de biomasa aérea en los tratamientos descompactados y fertilizados puede deberse a que la mayor producción de raíces que se produce en estos tratamientos (Tabla 3), permiten al cultivo tener una mayor oferta de agua y nutrientes, elementos que afectan tanto la generación como el mantenimiento del área foliar, modificando de esta manera la intercepción de la radiación y la biomasa producida (Carcova *et al.*, 2003). Sadras *et al.* (2005) describen que la compactación del suelo reduce dramáticamente la

intercepción de la radiación por parte del canopeo sin detectarse efectos sobre la eficiencia en el uso de la radiación.

La tasa de crecimiento del cultivo durante el periodo comprendido entre V14 y R2, difirió entre los tratamientos fertilizado y sin fertilizar ($p=0,035$), siendo superior en el primero, resultados similares fueron obtenidos por Viano (2010), quien encontró en el mismo sitio bajo estudio una respuesta significativa tanto de la tasa de crecimiento por planta como la tasa de crecimiento del cultivo, a la fertilización durante el periodo crítico del maíz (V13-R3). Estos resultados concuerdan con lo encontrado en el mismo lugar, en el año 2006/2007 por Pérez (2009). En cuanto al factor descompactación, no se observaron diferencias entre el tratamiento descompactado y sin descompactar ($p=0,209$), como tampoco interacción entre estos y la fertilización.

Rendimiento y sus componentes

El rendimiento de los cultivos puede ser estudiado a través de sus componentes numéricos, número de granos por unidad de superficie y el peso de mil granos, llamados también componentes directos del rendimiento (Andrade y Sadras, 2002). En el cultivo de maíz, ambos componentes (número y peso de granos) fueron afectados por el efecto interactivo de la descompactación y fertilización, sin embargo el rendimiento solo fue modificado por la fertilización (Tabla 7).

Al momento de la cosecha, se encontró diferencias estadísticamente significativas en el número final de plantas entre tratamientos de descompactación, donde el uso del descompactador provocó una caída del 8,69 % de las plantas logradas (Tabla 7). Esta disminución puede explicarse por la falta de piso de siembra detectada al momento de implantar el cultivo en las parcelas descompactadas, es factible que la cercanía temporal de esta labor con la operación de siembra haya impedido la reconsolidación del suelo y con ello una menor eficiencia de implantación.

Tabla 7. Rendimiento (kg ha^{-1}), número de plantas a cosecha (plantas ha^{-1}) y componentes del rendimiento: número de granos (granos m^{-2}) y peso de 1000 granos (g) de maíz, en función de la descompactación y fertilización fosforo- azufrada.

| | | Peso 1000 | Granos. m^{-2} | Rendimiento | Nº plantas a cosecha |
|--------------------------|-----|-----------|-------------------------|-------------|----------------------|
| Descompactado | Con | 279,24 | 2378,17 | 6686,45 a | 58972 a |
| | Sin | 283,40 | 2439,35 | 6953,26 a | 64100 b |
| | DMS | 4,93 | 57,48 | 560,32 | 3177 |
| Fertilizado | Con | 306,31 | 2640,97 | 8076,07 a | 61635 a |
| | Sin | 256,34 | 2176,55 | 5563,65 b | 61477 a |
| | DMS | 4,93 | 57,48 | 560,32 | 3177 |
| ANAVA | | | | | |
| Descompactado (D) | | ns | † | ns | † |
| Fertilizado (F) | | ††† | ††† | ††† | Ns |
| F*D | | †† | ††† | ns | Ns |
| C.V. | | 2,41 | 3,28 | 3,65 | 2,29 |

††† $p < 0,001$; †† $p < 0,01$; † $p < 0,05$; ns no significativo (LSD Fisher). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p \leq 0,05$). F*D, interacción fertilización por descompactación.

El número de granos por superficie fue modificado por la interacción de ambos factores (Tabla 7). Al analizar esta interacción (Figura 9) se observó que el mayor número de granos se obtuvo en los tratamientos fertilizados que no difirieron estadísticamente entre sí, mientras que en el tratamiento no fertilizado estos valores fueron menores, con diferencias entre las labores. Cabe aclarar que el número de granos por m^2 es consecuencia del número de plantas por superficie y del número de granos por planta (Andrade *et al.*, 1996). Si bien anteriormente se explicó que la descompactación generó un menor número de plantas (Tabla 7), la fertilización permitió compensar esto con una mayor producción individual y por ello no se encontraron diferencias estadísticas entre labranzas. En las parcelas sin fertilizar, la producción individual no compensó la producción de granos, diferenciándose así estadísticamente el número de granos por m^2 .

Costantino (2005), Oviedo (2005) y Lubrina (2008), hallaron resultados similares en soja, en el mismo sitio bajo estudio, quienes además demostraron el efecto interactivo entre el sistema de labranza y la fertilización sobre el número de granos.

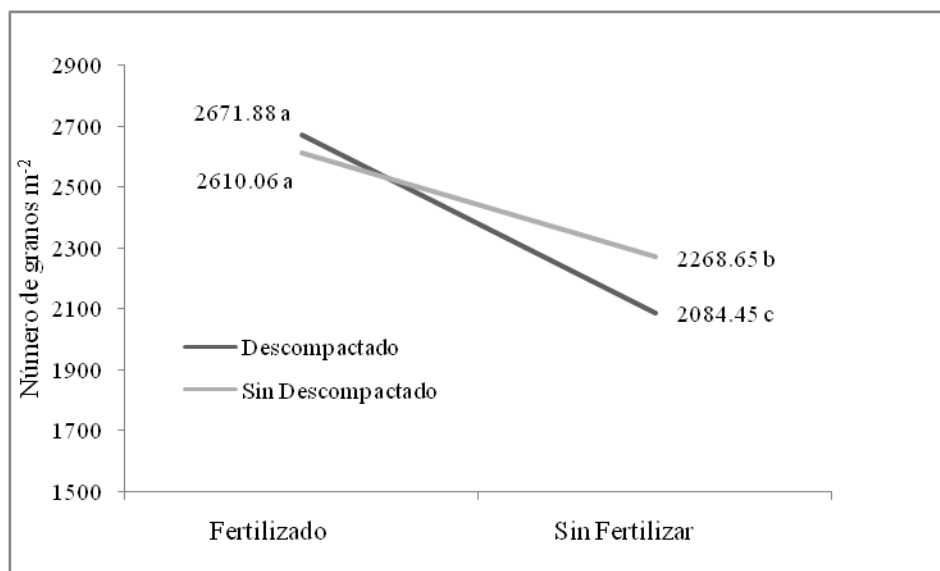


Figura 9. Número de granos m⁻² de maíz en función de la fertilización, para los tratamientos descompactado y sin descompactar. En la figura, letras distintas indican diferencias significativas LSD-Fisher ($p \leq 0,05$).

Para la variable del peso individual de los granos, se observó una interacción entre descompactación y fertilización estadísticamente significativa (Figura 10), obteniéndose en los tratamientos no fertilizados un menor peso que, a su vez, no difirieron estadísticamente entre las parcelas descompactada y sin descompactar. El mayor peso se obtuvo en tratamiento con fertilización y sin descompactación, seguida por la parcela descompactada y fertilizada, ambas difirieron estadísticamente entre sí y con los otros tratamientos. Viano (2010) no encontró diferencias en el peso de los granos al fertilizar. Por su parte, Oviedo (2005), observó en el mismo sitio experimental para el cultivo de soja, un efecto de interacción entre los sistemas de labranza y la fertilización, esto coincide con lo encontrado por Lubrina (2008) en la campaña 2005/06.

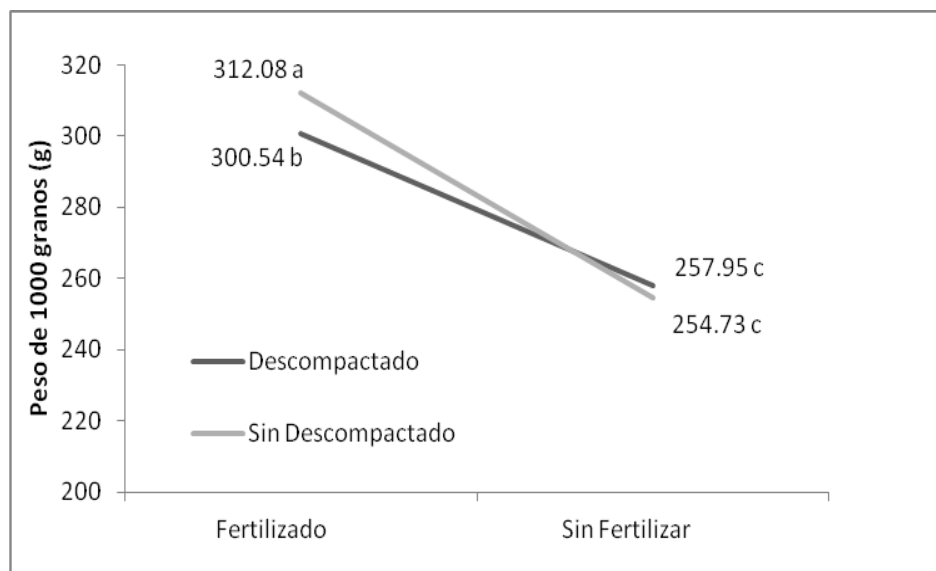


Figura 10. Peso de 1000 granos de maíz (g) en función de la fertilización, para los tratamientos descompactado y sin descompactar. En la figura, letras distintas indican diferencias significativas LSD-Fisher ($p \leq 0,05$).

Los resultados de este trabajo coinciden con lo expresado por Andrade *et al.* (1996), los cuales comprueban que el número de granos por unidad de superficie es el principal responsable de las variaciones de rendimiento. Como se puede apreciar en la Figura 11, donde el ajuste encontrado entre ambas variables fue del 82,1% con una regresión lineal simple estadísticamente significativa.

El rendimiento en grano también se correlacionó de manera lineal con el peso individual de los mismos. En la Figura 12 se observa un ajuste del 72,2 % entre ambas variables. Es factible que exista compensación entre componentes del rendimiento (de manera parcial) puesto que un mayor número puede generar un menor peso individual (Carcova *et al.*, 2003). Este comportamiento se puede observar en la Figura 13, donde los tratamientos que favorecieron un mayor número de granos son los que presentaron un menor peso individual, observándose que las interacciones entre estos componentes se presentan de manera antagónica y dan como resultado una falta de interacción en el rendimiento ($p = 0,5$) (Tabla 5). Este antagonismo entre componentes fue agravado por el hecho de una caída de granizo durante el periodo de llenado de granos (R3), la cual disminuyó en un 40% el área foliar del maíz afectando la interceptación del cultivo entre R3 y R6, momento coincidente con el llenado de los granos (Andrade *et al.*, 1996).

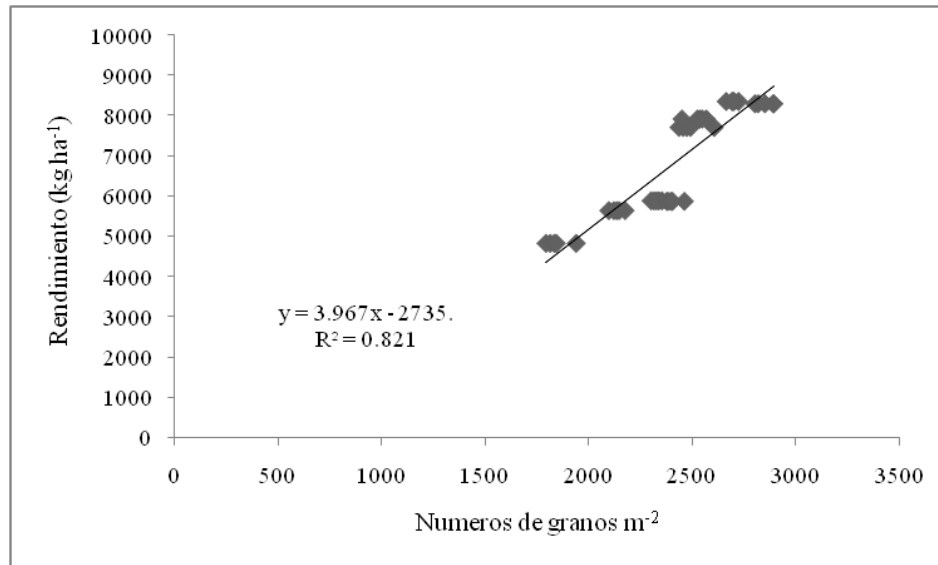


Figura 11. Rendimiento de maíz (kg ha⁻¹) en función del número de granos m².

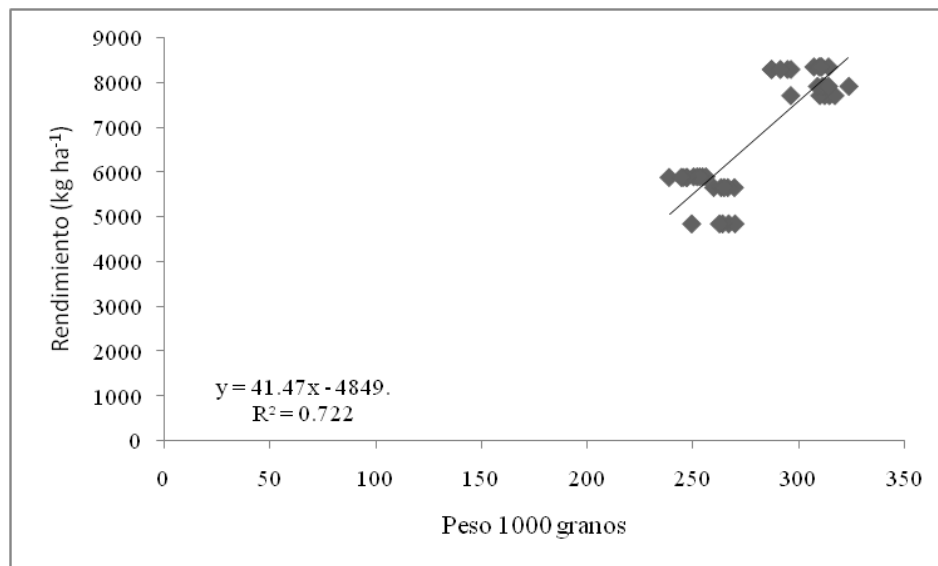


Figura 12. Rendimiento de maíz (kg ha⁻¹) en función del peso 1000 granos.

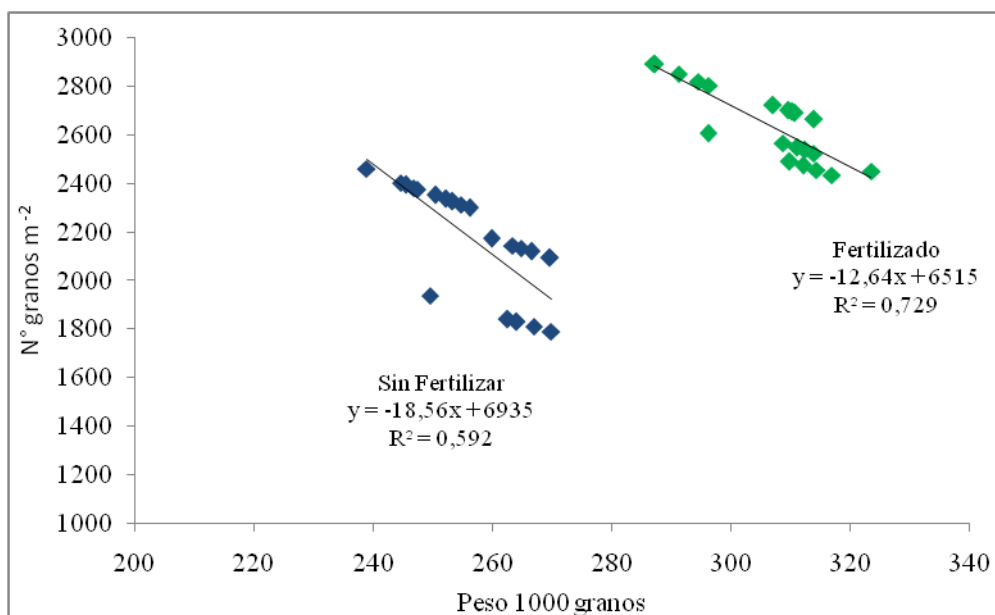


Figura 13. Número de granos m^{-2} en función del peso de 1000 granos (g) de maíz en los tratamientos fertilizados (azul) y sin fertilizar (verde).

Finalmente, se destaca que el rendimiento solo fue afectado por la fertilización, obteniéndose 8076 kg ha^{-1} al fertilizar y 5563 kg ha^{-1} al no fertilizar, mientras que entre los tratamientos de descompactación no se presentaron diferencias significativas (6686 y 6953 kg ha^{-1} , respectivamente (Tabla 7).

Estudios realizados por Barber y Díaz (1992) en el cultivo de soja, en los cuales se evaluó los efectos de descompactación y fertilización, no mostraron efectos interactivos entre estos factores y si una respuesta significativa a la fertilización.

Resultados similares fueron reportados por Giayetto *et al.* (1998), quienes encontraron un mayor impacto de la rotación que la labranza, en un estudio en la zona de Gral. Deheza, utilizando el mismo dispositivo descompactador al de este estudio. En otro trabajo realizado por Giayetto *et al.* (1996), se encontró que mientras la rotación afecta estadísticamente el rendimiento, la descompactación solo produce una tendencia positiva, pero no significativa estadísticamente.

Por su parte Cerioni¹, en el mismo sitio de estudio observó en el cultivo de soja (2005/06) una mayor respuesta de la fertilización sobre la labranza y la rotación. Otros estudios realizados en el campo experimental “Pozo del Carril”, demuestran el mayor impacto de la

¹ Comunicación personal: Guillermo Cerioni. Departamento de Producción Vegetal “Profesor Jorge J. Gesumaria”. FAV-UNRC.

fertilización sobre el rendimiento frente a los sistemas de labranza, tanto para el cultivo de maíz (Perez, 2009; Viano, 2010), como para el cultivo de soja (Costantino, 2005; Oviedo, 2005; Lubrina, 2008).

Relación entre rendimiento y tasa de crecimiento del cultivo (TCC) entre V14-R2

Andrade *et al.* (1996), plantea que las condiciones de crecimiento del maíz durante el periodo crítico definen la cantidad de los destinos reproductivos y la productividad del mismo. Además sugiere, que el periodo alrededor de floración es clave para la definición del número de espigas por m^2 y el número de granos por espigas y por ende del número de granos por m^2 , afectando directamente el rendimiento. Por lo tanto una elevada TCC permite una mayor fijación de granos afectando directamente al rendimiento, en concordancia con esto, en este estudio se encontró que los tratamientos en donde la TCC fue mayor el rendimiento fue incrementado observándose una correlación lineal entre la TCC y el rendimiento (Figura 14), explicando la TCC el 77,6 % del rendimiento. La variabilidad de la TCC presentada en esta figura se asocia con la respuesta al uso o no de la fertilización y su impacto en la producción de granos.

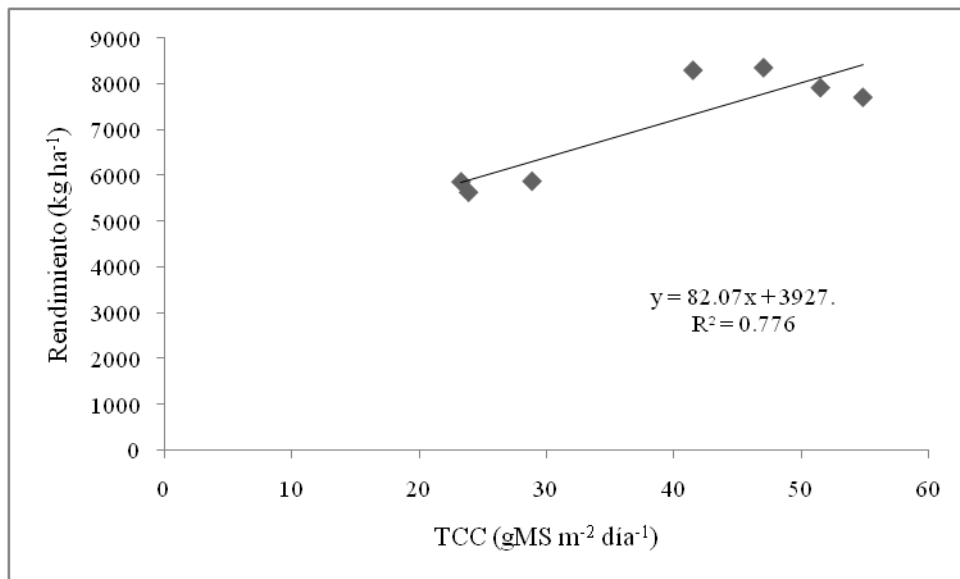


Figura 14. Rendimiento del cultivo ($kg\ Ha^{-1}$) en función de la TCC ($gMs\ m^{-2}\ día^{-1}$) entre V14 y R2.

Relación entre rendimiento y biomasa de raíces.

En las Figuras 15 y 16, se muestra la relación entre la biomasa de raíces y el rendimiento en las dos profundidades evaluadas, donde se puede observar que no se encontró relación entre ambas variables, en función de los bajos valores de R^2 hallados.

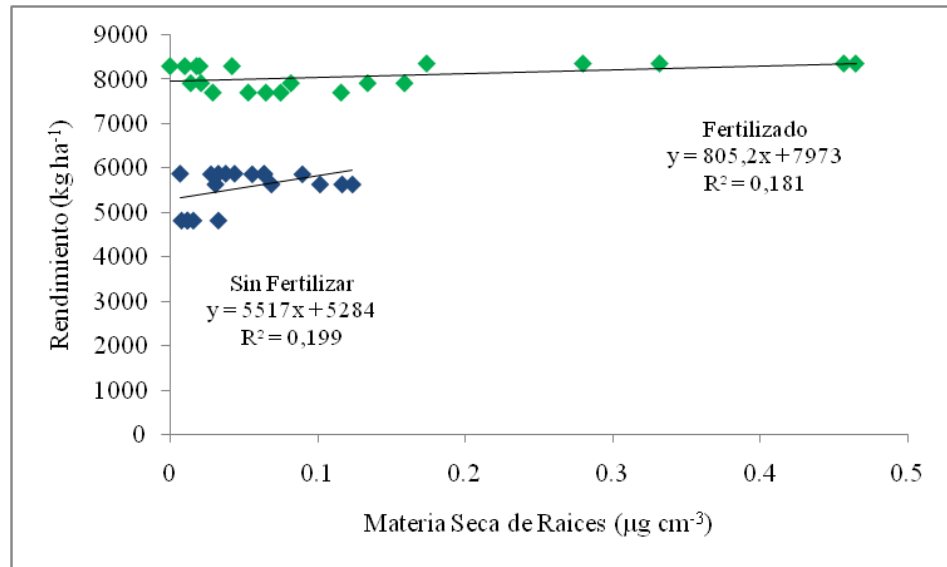


Figura 15. Rendimiento del cultivo (kg ha⁻¹) en función de materia seca de raíces (µg cm⁻³), en una profundidad de 0-0,2 m, para los tratamientos fertilizados (verde) y no fertilizados (azul).

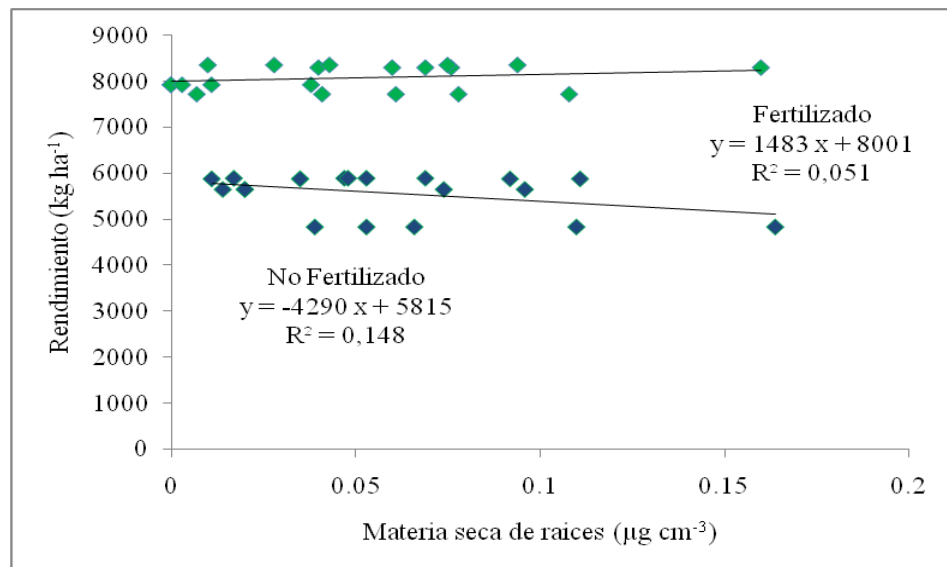


Figura 16. Rendimiento del cultivo (kg ha⁻¹) en función de materia seca de raíces (µg cm⁻³), en una profundidad de 0,2-0,4 m, para los tratamientos fertilizados (verde) y sin fertilizar (azul).

Al contrario de lo descrito en la bibliografía (Passioura, 2002; Sadras *et al.*, 2005), en el presente trabajo no se encontró correlación estadísticamente significativa entre el rendimiento y la biomasa de raíces a 20 ($p = 0,26$) y 40 cm ($p = 0,5$) de profundidad del perfil del suelo (Figuras 13 y 14). Estos autores resaltan la importancia morfofisiológica de las raíces (captura de agua y nutrientes y sistema de señales inhibitorias del crecimiento hídricas y no hídricas hacia la parte aérea de la planta) y su efecto sobre el crecimiento y el rendimiento de los cultivos. Los resultados encontrados en este estudio, contrarios a lo señalado anteriormente, pueden deberse a la ocurrencia de períodos de sequías que provocaron que estas respuestas señaladas anteriormente no se expresaran en tales condiciones y por lo tanto no influyeron en el rendimiento final del maíz, al respecto Sadras y Calviño (2001) señalan que ante períodos con escasas precipitaciones el desarrollo del sistema radical compite en algunos casos por asimilados con otros destinos de mayor importancia productiva directa (número y peso de granos).

A su vez Sadras *et al.* (2005) describen en base a sus propios resultados, en el cultivo de trigo, y a los encontrados por Strizaker *et al.* (1992) y Montagu *et al.* (1998) en diferentes cultivos hortícolas, que aunque el desarrollo de raíces se ve alterado por los cambios en la compactación del suelo, el crecimiento aéreo puede ser normal, si la planta es capaz de obtener suficiente agua y nutrientes.

Además, estos autores simularon la respuesta del rendimiento del cultivo de trigo a la descompactación a través de diversas combinaciones de escenarios edafoclimáticos, dados por la pluviometría del ciclo del cultivo (extremadamente húmedos y secos), asociados a diferentes porcentajes de agua almacenada en el suelo al momento de la siembra. En estas simulaciones solo se observaron respuestas del rendimiento en aquellas situaciones en las que se encontraba agua almacenada en el perfil del suelo independientemente de las condiciones hídricas que ocurrían durante el ciclo del cultivo.

Barber y Diaz (1992) al estudiar el comportamiento del cultivo de soja a la descompactación, encontraron una respuesta inversa a las precipitaciones ocurridas durante la temporada del cultivo, con incrementos del 90% en el rendimiento cuando las lluvias fueron inferiores a 760 mm y cercanos a 0 cuando las lluvias fueron superiores a dicho valor.

Similarmente a lo planteado por Sadras *et al.* (2005), en el presente estudio no se encontraron diferencias en el rendimiento del cultivo por efecto de la descompactación en una temporada con bajas precipitaciones durante el ciclo (Figura 2), y con un contenido hídrico en profundidad (de los 60 a 100 cm) inferior al agua útil del suelo, siendo la diferencia entre los tratamientos descompactado y sin descompactar de solo 4 mm (Figura 5). Por lo tanto, a pesar de

realizar una labor de descompactación que permitió un mayor crecimiento radical en profundidad, las mismas no contaron con la humedad suficiente que permita un mayor crecimiento vegetal y producción de granos.

CONCLUSIONES

Los resultados experimentales permiten concluir que la biomasa de raíces del cultivo de soja y maíz fue modificada en forma diferencial. En soja, la biomasa final de raíces solo fue afectada por la fertilización en los primeros cm de suelo, mientras que a mayor profundidad (20 a 40 cm) se observó un efecto aditivo de los factores. Por el contrario, la biomasa de raíces en maíz fue afectada de manera interactiva por la descompactación y la fertilización, mientras que a mayor profundidad solo se observó un efecto de la descompactación.

La biomasa aérea inicial del cultivo de soja no fue modificada por los tratamientos, no se pudieron realizar estimaciones en estadios más avanzados como consecuencia del granizo que eliminó completamente el cultivo. En maíz, la acción conjunta de la descompactación y la fertilización incrementa el crecimiento de biomasa vegetativa; si no se fertiliza no se detecta efecto en la descompactación. En las etapas reproductivas, la descompactación y la fertilización actúan de manera aditiva, donde las mayores producciones se obtienen con la acción conjunta de ambas.

El rendimiento de maíz sólo fue afectado por la fertilización, demostrando el mayor impacto de esta práctica que la labranza, mientras que sus componentes directos fueron afectados por la interacción de los factores en estudio. A su vez, no se encontró una relación entre la biomasa de raíces y rendimiento de maíz. La ausencia de respuesta al rendimiento como consecuencia de la descompactación puede ser explicada por el menor número de plantas logradas en este tratamiento. Por ello, sería conveniente evaluar alternativas que permitan mejorar las condiciones de piso de siembra luego del uso del descompactador.

Estos resultados se dieron en ciclos con un registro pluviométrico inferior a la media zonal y baja disponibilidad de agua almacenada en profundidad, por lo que se puede inferir que en diferentes condiciones ambientales estas respuestas pueden cambiar. Poniendo de evidencia aspectos que requieren mayor profundización y que se puede lograr mediante el análisis de una serie más prolongada de años y en condiciones meteorológicas diferentes a la del presente estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- ALAKUKKU, L.; P. WEISSKOPF; W.C.T. CHAMEN; F.G.J. TIJINK; J.P. VAN DER LLINDEN; S. PIRES, C. SOMMER; y G. SPOOR. 2003. "Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: A review Part. 1. Machine/soil interactions", *Soil and tillage research*, 73: 145-160.
- ANDRADE, F.; A. CIRILO; S. UHART y M. OTEGUI. 1996. Determinación del rendimiento. Capítulo 3. En: *Ecofisiología del cultivo de Maíz*. Ed. Andrade, F.; A. Cirilo; S. Uhart Y M. Otegui. Pp 81-96.
- ANDRADE, F. y V. O. SADRAS. 2002. Bases ecofisiológicas para el manejo del Maíz, el Girasol y la Soja. Estación Experimental Agropecuaria Balcarce (INTA)- Facultad de Ciencias Agrarias (Universidad Nacional de Mar del Plata). 450 p.
- BARBER R. G. y O. DIAZ. 1992. Effects of deep tillage and fertilization on soya yields in a compacted Ustochrept during seven cropping seasons, Santa Cruz, Bolivia. *Soil and tillage research* 22: 371-381.
- BATEMAN, J.C. y D.S. CHANASYK. 2001. Effects of deep ripping and organic matter amendments on Ap horizons of soil reconstructed after coal strip-mining. *Can. J. Soil Sci.* 8: 113–120.
- BECKER, A. 2001. Evaluación del proceso de degradación de suelos por erosión hídrica en una subcuenca representativa de la región pedemontana del suroeste de la provincia de Córdoba, Argentina. Informe Tesis doctoral. Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina. 30 p.
- BERARDO A., F. GRATTONI y G. BORRAJO. 1999. Fertilización fosfatada de trigo: Respuesta y forma de aplicación. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. Acassuso, Argentina. p: 1-3.
- BERARDO A. y M. A. MARINO. 2000. Efecto de la fertilización fosfatada sobre la disponibilidad de P y su relación con la producción de forraje en molisoles del sudeste bonaerense. II. Alfalfa. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina.
- BERARDO, A. 2003. Manejo del fósforo en los sistemas de producción pampeanos. En: Simposio "El Fósforo en la Agricultura Argentina". pp 38-44. Inpofos Cono Sur, Rosario, Argentina.
- BERLI, M. 2001. Compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Instituto Federal Suizo de Tecnología de Zurich, Zurich, Suiza. 141pp.
- BINGHAM, I. J.; GLYN BENGOUGH A.; y R. M. REES. 2010. Soil compaction-N interactions in barley: Root growth and tissue composition. *Soil y tillage Research* 106: 241-246.
- BOCCARDI, F. Y R. BOCCARDI. 2007. Soja en Argentina: Cosecha Amarga. En www.ecoport.net/content/view/full/66465. Consultado 26/10/2011.

- BOTTA, G.; D. JORAJURIA y L. DRAGHI. 2002. "Influence of the axle load, tire size and configuration, on the compaction of a freshly tilled clayey soil". *Journal of Terramechanics*, 39: 47-54.
- BRICCHI, E. 1996. Relaciones entre la compactación, morfología y propiedades físicas de un Hapludol típico de Río IV. Tesis para obtención del título Magíster Scientiae – Area Ciencias del Suelo. UBA.
- CANTÚ, M. P. 1992. Holoceno de laprovincia de Córdoba. Manual: Holoceno de la Republica Argentina. Tomo I. Simposio Internacional sobre el Holoceno en America del Sur. Ed martin Iriondo, Parana, Argentina. 24 p.
- CANTÚ, M. P. 1998. Estudio Geocientifico para la Evaluación Ambiental y Ordenación Territorial de una cuenca Pedemontana. Caso: Cuenca del arroyo La Colacha, Departamento de Río Cuarto, Provincia de Córdoba. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina.
- CARCOVA J.; L. BORRÁS Y M. E. OTEGUI. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y calidad en maíz. En: Satorre E.H.; R.L. Benech Arnold; G.A. Slafer; E.B. de la fuente; D. Miralles; M. E. Otegui y R. Savin. Producción de Granos Bases funcionales para su manejo. Ed. Facultad Agronomía UBA. Cap. 8. P: 135-166.
- CASSMAN K.G.; A.S. WHITNEY y K.R. STOCCKINGER. 1980. Root Growth and Dry Matter Distribution of Soybean as Afected by phosphorus Stress, Nodulation, and Nitrogen Source. *Crop Science* 20: 239-244.
- CISNEROS J., C. CHOLAKY, O. GIAYETTO y J. CANTERO. 1997. Efectos del uso agrícola sobre las propiedades físicas de un suelo Haplustol típico del Centro de Córdoba. *Rev UNRC* 17: 13-22.
- CISNEROS, J.M., A. CANTERO G., J. MARCOS, A. DEGIOANNI, E. BRICCHI, O. GIAYETTO, C. CHOLAKY, E. BONADEO, G.A. CERIONI y M. UBERTO. 1998. Comportamiento de un subsolador alado adaptable a implementos de uso común. En : Ingeniería Rural y Mecanización agraria en el ámbito latinoamericano, Editores Responsables Balbuena, R.H., Benz, S.H. y Jorajuría, D. Editorial U.N.L.P. p. 128-136.

- CLARK, R. y L. HUMPHREYS. 1996. Impact compaction for reducing recharge from rice. Farmers' Newsletter, Berrigan, New South Wales, Australia, 149: 20–23.
- COSTANTINO, J. L. 2005. Efecto de la rotación, labranza y fertilización fosfatada sobre la materia seca y el rendimiento en soja. Tesis de grado. Universidad Nacional de Río Cuarto. Córdoba. Argentina. 33 p.
- DEGIOANNI A. J. 1998. Organización territorial de la Producción agraria en la Región de Río Cuarto (Argentina). Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá de Henares. Dpto. de Geografía. Alcalá de Henares. España.
- DI RIENZO J.A.; F. CASANOVES; M.G. BALZARINI; L. GONZALEZ; M. TABLADA y C.W. ROBLED0. 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- ESPOSITO, G. P. 2002. Propiedades hidrofísicas del suelo asociadas a diferentes sistemas de labranzas en cultivo de maíz. Tesis de Maestría. Facultad de Agronomía y Veterinaria. Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina.
- ESPOSITO, G. P. 2007. Doce años de experimentación de ganadería con siembra directa. IV Simposio de ganadería en siembra directa (AAPRESID). San Luis, Argentina.
- FEHR W. P. y C. E. CAVINESI. 1977. Stages of soybean development. Ames, IA: Agriculture and Home Economics Experiment Station and Cooperative Extension Service, Iowa State University Special Report 80. II p
- FERRARIS G. 2007. “Descompactación de suelos bajo siembra directa continua”. En www.inta.gov.ar/PERGAMINO/info/documentos/Descompactaci%C3%B3n%20de%20suelos.pdf. Consultado 26/10/2011.
- GARCÍA F. O., K. P. FABRIZZI, A. BERARDO y F. JUSTEL. 1998. Fertilización nitrogenada de trigo en el sudeste bonaerense: Respuesta, fuentes y momentos de aplicación. XVI Congreso Arg. Ciencia del Suelo. Carlos Paz, Córdoba.
- GARCÍA, F. 2000. Requerimientos nutricionales de los cultivos. Jornada de actualización técnica para profesionales "Fertilidad 2000", INPOFOS, Rosario. Argentina. p: 40-43

- GIARDINIERI, N. CH; N. C. GUTIERREZ; y C. A. VENIALGO. 2004. Influencia de la compactación sobre el crecimiento radical en maíz y soja. Universidad Nacional del Nordeste. Comunicaciones Científicas y tecnológicas. Resumen A:0-73. Corrientes. Argentina.
- GIAYETTO, O.; G. A. CERIONI ; W. E. ASNAL y J. M. CISNEROS. 1996. Respuesta de los cultivos al efecto combinado de secuencias anuales y labranzas en sistemas agrícolas. 11^{ma} Jornada Nacional del Maní. General Cabrera, Córdoba, argentina. p: 28:33.
- GIAYETTO, O.; J. M. CISNEROS; G. A. CERIONI y C. CHOLAKY. 1998. Rotaciones y labranzas en sistemas agrícolas del centro de Argentina. Produccion de Cultivos. Ingenieria Rural y Mecanización Agraria en el ámbito Latinoamericano. p: 111-119.
- GOMEZ, M. A. 2011. Efecto de una labor de descompactación subsuperficial sobre el almacenamiento de agua en un Hapludol típico del sur Cordobes manejado en siembra directa. Tesis de grado. Universidad Nacional de Rio Cuarto. Córdoba. Argentina. 44 p.
- GORGAS J. A. y J. L. TASSILE. 2006. Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba – Los Suelos. Agencia Córdoba Ambiente – INTA. 546 p.
- GUTIÉRREZ BOEM, F.; J. SCHEINER, L. MARTÍN y R. LAVADO. 2002. Respuesta del cultivo de soja a la fertilización fosforada y nitrogenada. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del suelo. Puerto Madryn- Chubut, Argentina. p: 16-19.
- GYSI, M.; V. MAEDER y P. WEISSKOPF. 2001. “Pressure distribution underneath tires of agricultural vehicles”, Transactions of ASA, 44: 1385-1389.
- JARVIS, R. J.; A. P. HAMBLIN; y N. D. DELROY. 1986. Continuous cereal cropping with alternative tillage systems in Western Australia. Agriculture, Western Australia, Technical Bulletin No. 71, pp. 37.
- KELLER, T. 2004. Soil compaction and soil tillage studies in agricultural soil mechanics. Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Universidad Sueca de Ciencias Agrícolas, Uppsala, Suecia.
- LARSON, W.E. ; GUPTA, S.C. Y R.A. USECHE. 1980. Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 450–457.

- LIPIEC, J. ; A. FERRERO ; V. GIOVANETTI ;A. NOSALEWICZ, y M. TURSKI. 2002. Response of structure to simulated trampling of woodland soil. *Adv. Geoecol.* 35, 133–140.
- LUBRINA, M. 2008. Efecto de la fertilización continua con fósforo bajo diferentes sistemas de labranza sobre el rendimiento de soja. Tesis de grado. Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina. 27 p.
- MARSCHNER H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press, London 2nd edition. p 889.
- MEDVEDEV, V.V. y W.G. CYBULKO. 1995. Soil criteria for assessing the maximum permissible ground pressure of agricultural vehicles on Chernozem soils. *Soil Tillage Res.* 36: 153–164.
- MOLLIER A. y S. PELLERIN. 1999. Maize root system growth and development as influence by phosphorus deficiency. *Journal Experimental of botany* 50: 487497.
- MORENO, I; CHOLAKY, C.; LESSER, M. y J. MARCOS. 1996. Efecto de la labranza sobre el contenido de carbono orgánico y su implicancia en la estabilidad estructural. Actas XV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo: 26 a-26 b.
- MOSADDEGHI, M.R.; M.A. HAJABBASI ; A. HEMMAT y M. AFYUNI. 2000. Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. *Soil Tillage Res.* 55: 87–97.
- NUÑEZ, M. C. y E. C. de BISBAL. 1999. Efecto dela compactación del suelo sobre algunos parámetros morfológicos del desarrollo radical del maíz. *Agronomía Tropical* 49: 93-106.
- OVIEDO, C. 2005. Consumo y eficiencia de uso de agua de la soja, en distintos sistemas de labranza con y sin fertilización. Tesis de grado. Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Argentina. 45 p.
- PASSIOURA, J. P. 2002. Soil Conditions and plant growth. *Plant, Cell and Enviroment.* 25: 311-318.
- PANAYIOTOPOULOS, K.P.; C.P. PAPADOPOULOU y A. HATJIIOANNIDOU. 1994. Compaction and penetration resistance of an Alfisol and Entisol and their influence on root growth of maize seedlings. *Soil Tillage Res.* 31: 323–337.

- PEREZ, N. A. 2009. Efecto de la fertilización nitrogenada bajo siembra directa sobre la eficiencia en el uso del agua, producción de materia seca y rendimiento de maíz. Tesis de grado. Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad nacional de Río Cuarto, Argentina. 63p.
- RITCHIE W. y J HANWAY.1997. "How a corn plant develops". Special Reports Num. 48. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service Ames. Iowa: 21p.
- ROSOLEM C.A.; A. ALMEIDA y L. SACRAMENTO. 1994. Sistema radicular e nutricao da soja em funcao da compactacao do solo. *R. Bras.Ci.Suelo*. 53: 259-266.
- SADRAS, V. O. y P. A. CALVIÑO. 2001. Quantification of Grain Yield Response to Soil Depth in Soybean, Maize, Sunflower, and Wheat. *Agronomy Journal*. 93: 577-583.
- SADRAS, V.; G. J. O'LEARY y D. K. ROGET. 2005. Crop responses to compacted soil. Capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crop Reseach* 91: 131-148.
- SAGyP. 1995. La conservación productiva de la tierra y el agua. En: **El deterioro de las tierras en la Republica Argentina**. Capitulo 1. p: 1-22.
- SEKER, C. y A.A. ISILDAR. 2000. Effects of wheel traffic porosity and compaction of soil. *Turkish J. Agric. Forestry* 24: 71-77.
- SIIA. 2011. Series temporales relacionadas a cultivos – Producción - área sembrada y cosechada, cotizaciones nacionales e internacionales. En: <http://www.sii.gov.ar/index.php/series-portema/agricultura>. Consultado el: 26/10/2011
- SOANE, B.D. y C. VAN OUWERKERK. 1994. Soil Compaction in Crop Production, Developments in Agricultural Engineering Series, vol. 11. Elsevier Science, Amsterdam, The Netherlands, pp. 662.
- SSSAJ. 2008. Glossary of Soil Science Terms. Soil Science Society of America Journal. Madison, WI, USA. pp. 88.
- STIRZAKER, R. G.; J. B. PASSIOURA y Y. WILMS. 1992. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. *Plant and soil* 185: 151-162.

- TAYLOR, H.M. 1971. Effect of soil strength on seedling emergence, root growth and crop yield. *Compaction of Agricultural Soils*, American Society of Agricultural Engineering, p. 292–305.
- VÁZQUES, M. 2002. Balance y fertilidad fosforada en suelos productivos de la región pampeana. *Informaciones agronómicas del Cono Sur. Edición especial sobre el simposio "Enfoque sistémico de la fertilización fosforada"*. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn- Chubut, Argentina. 16: 3-7.
- VIANO, D. V. 2010. Influencia de los sistemas de labranza, la fertilización y el pastoreo de los rastrojos sobre la eficiencia de intercepción y conversión de la radiación en maíz (*Zea mays* L.). Tesis de grado. Facultad de agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina. 91 p.
- WEBER, R.; B. HRYNCZUK; A. BISKUPSKI y S. WLODEK. 2000. Variability of compaction, density and moisture of soil as depending on the tillage technique. *Inzynieria Rolnicza* 6: 319–325.

ANEXO I

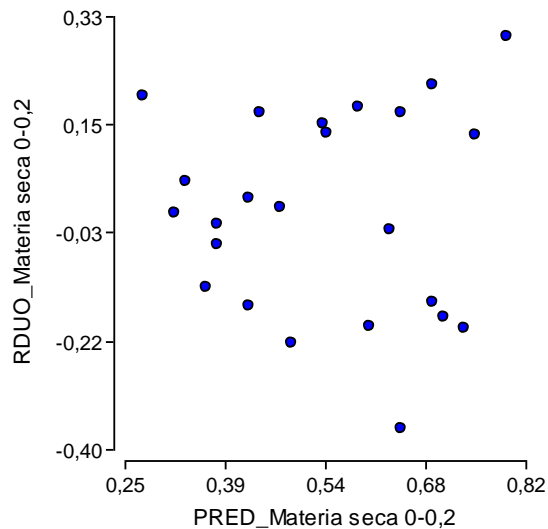


Figura 17. Residuos de los valores de materia seca de raíces de soja en función de los valores predichos, en el estadio V2, entre los 0-0,2 m de profundidad.

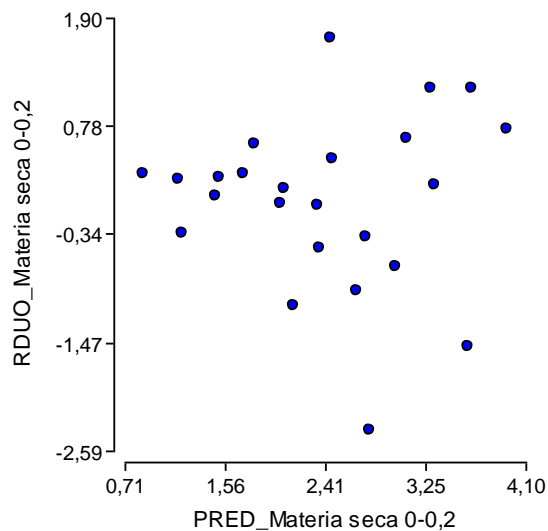


Figura 18. Residuos de los valores de materia seca de raíces de soja en función de los valores predichos, en el estadio R3, entre los 0-0,2 m de profundidad.

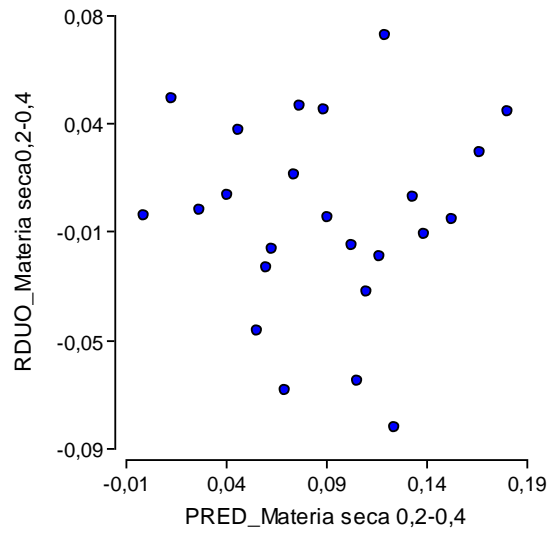


Figura 19. Residuos de los valores de materia seca de raíces de soja en función de los valores predichos, en el estadio R3, entre los 0,2-0,4 m de profundidad.

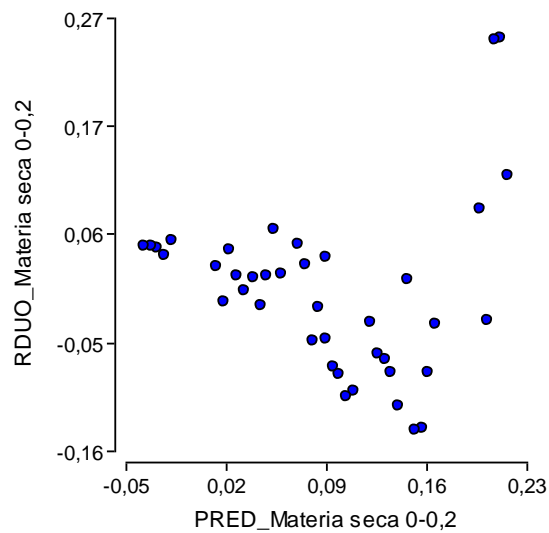


Figura 20. Residuos de los valores de materia seca de raíces de maíz en función de los valores predichos, en el estadio V8, entre los 0-0,2 m de profundidad.

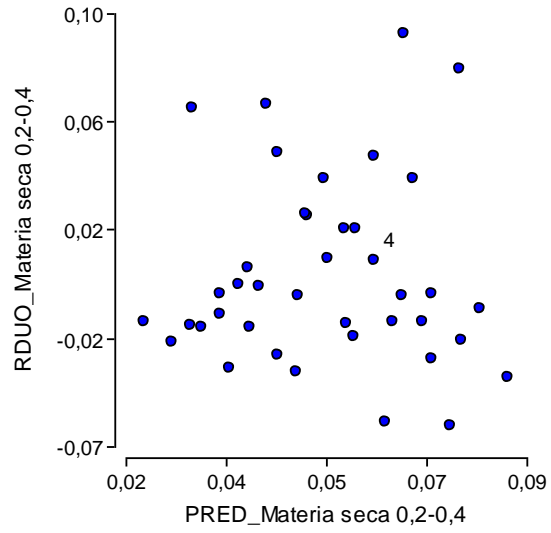


Figura 21. Residuos de los valores de materia seca de raíces de maíz en función de los valores predichos, en el estadio V8, entre los 0,2-0,4 m de profundidad.

ANEXO II

FOTOGRAFÍAS



Fotografía 1, 2 y 3: Extracción de muestras de suelo para determinación de biomasa radical en el cultivo de soja.



Fotografías 4, 5, 6 y 7: Extracción de muestras de suelo para determinación de biomasa radical en el cultivo de maíz.





Fotografía 8, 9, 10 y 11: Proceso de lavado de muestras para la determinación de biomasa radical en el cultivo de maíz.



Fotografía 12: Raíces del cultivo de soja en función de los tratamientos de descompactación y fertilización en estadio fenológico R3.