

# Cuantificación de los efectos del tráfico de la maquinaria agrícola sobre el suelo y el rendimiento del cultivo de girasol (*Helianthus annuus* L.)

Botta, G. F., Romay, C., Rivero, E. R. D., Ezquerro-Canalejo, A., Ghelfi, D. G. e Hidalgo, R. J.

DOI: 10.31047/1668.298x.v40.n2.40953

## RESUMEN

La germinación de semillas y la producción de cultivos dependen del sistema de siembra, las condiciones mecánicas y el contenido de agua del suelo. El objetivo principal de este trabajo fue cuantificar los efectos del tráfico agrícola sobre la compactación del suelo, la emergencia y el rendimiento del girasol (*Helianthus annuus* L.) en dos condiciones de suelo: no-labranza (NL) y labranza convencional (LC). El ensayo se localizó en el oeste de la región pampeana durante tres años sobre suelo Hapludol éntico. Los parámetros medidos fueron: (1) emergencia de semillas, (2) densidad aparente seca, (3) índice de cono, (4) infiltración de agua y (5) rendimiento del cultivo. Los principales resultados mostraron que la emergencia fue 17,3 % más temprana en LC que NL y los valores de índice de cono y densidad aparente fueron menores para el suelo en LC hasta los 450 mm. Los rendimientos promedios fueron de 3,23 ton ha<sup>-1</sup> y 1,99 ton ha<sup>-1</sup> para LC y NL, respectivamente. La principal conclusión es que el suelo bajo LC posee bajos niveles de compactación hasta los 150 mm, esto resultó en un mayor número de brotes de plantas logrando una distribución del cultivo más uniforme que NL.

**Palabras clave:** mecanización agrícola, peso por eje, intensidad de tránsito, cultivo

Botta, G. F., Romay, C., Rivero, E. R. D., Ezquerro-Canalejo, A., Ghelfi, D. G. and Hidalgo, R. J. (2023). Quantification of the effects of agricultural machinery traffic on soil and sunflower yields (*Helianthus annuus* L.). *Agriscientia* 40 (2): 23-35

## SUMMARY

Seeds germination and crop productions depend mostly on the planting methods used, initial soil mechanical conditions and soil moisture. The main objective of this work was to quantify the agricultural traffic effects on soil

compaction, sunflower (*Helianthus annuus* L.) seed emergence and yield under two different soil mechanical conditions: No-tillage (NT) and conventional tillage (CT). The trial was located in the western Pampas region during three cropping seasons on an Entic Hapludoll. The parameters measured were: (1) seed emergence, (2) dry bulk density, (3) cone index, (4) water infiltration and (5) crop yields. The main results showed that the emergence was 17.3 % earlier in LC than in NL and the cone index and bulk density values were lower for the CT up to 450 mm. The average yields for the 3 cropping seasons were 3.23 tons ha<sup>-1</sup> and 1.99 tons ha<sup>-1</sup> for CT and NT, respectively. The main conclusion is that the soil worked under CT is a soil with a low compaction level up to 150 mm. This, in turn, led to a higher plant emergence count and to a more uniform crop establishment and distribution than in the soil worked under NT.

**Keywords:** agricultural mechanization, axle load, traffic intensity, crop

*G. F. Botta (ORCID: 0000-0002-6302-921X): Universidad Nacional de Luján, Departamento de Tecnología, Luján, Buenos Aires, Argentina. Universidad Nacional de La Pampa, Facultad de Agronomía, La Pampa. C. Romay (ORCID: 0009-0008-1367-094X): Universidad de Buenos Aires, Departamento de Ingeniería Agrícola y uso de la Tierra, FAUBA, CABA, Argentina. E. R. D. Rivero (ORCID: 0000-0002-8891-0492): Universidad Nacional de La Pampa, Facultad de Agronomía, Santa Rosa, La Pampa, Argentina. A. Ezquerro (ORCID:0000-0003-4133-6996): Canalejo, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. D. G. Ghelfi (ORCID: 0009-0003-2317-3262): Universidad Nacional de Luján, Departamento de Tecnología, Luján, Buenos Aires, Argentina. R. J. Hidalgo (ORCID:0000-0002-3754-6619): Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Nordeste, Corrientes, Argentina.*

Correspondencia: gfbotta@agro.uba.ar

## INTRODUCCIÓN

El factor más importante a controlar en la siembra es lograr una germinación y emergencia de plantas uniformes en el menor tiempo posible, evitando así pérdidas de semillas y, consecuentemente, pérdidas de rendimiento de los cultivos (Godwin, 1990).

La germinación de las semillas y la emergencia de las plantas dependen de las características intrínsecas de las semillas, pero también de las condiciones mecánicas del suelo en el que se siembran. Además del contenido de agua del suelo y el rastrojo en la superficie del suelo en el momento de la siembra, el estado de compactación del suelo es un factor que juega un papel clave en el éxito de la siembra.

Las consecuencias de la compactación del suelo agrícola por el tráfico de maquinaria suelen ser persistentes y suelen ser severas

cuando se extiende hasta el subsuelo, es decir, aproximadamente por debajo de los 300 mm (Håkansson y Reeder, 1994 y Chamen et al., 2003).

En los últimos 20 años se ha generado mucho conocimiento sobre el manejo y conservación de suelos agrícolas. Sin embargo, también ha habido informes contradictorios sobre los resultados de los diferentes sistemas de labranza utilizados sobre la compactación del suelo. De hecho, estos resultados, están estrechamente relacionados con el cultivo, el clima, el tipo de suelo y el manejo del suelo (Masola et al., 2020).

En Argentina se siembran, en forma continua, 30 Mha anuales bajo el sistema de siembra directa o no-labranza (NL). El resto de la superficie agrícola arable se cultiva bajo el sistema de labranza convencional (LC). En este contexto, en el centro-oeste de la pampa argentina se cultiva girasol (*Helianthus annuus* L.) sobre suelos, en su mayoría, Haplustoles y Hapludoles énticos. Estos suelos ocupan una superficie aproximada de 1,27 Mha. El

cultivo realizado en NL es el sistema mecanizado dominante, aunque también existen importantes extensiones trabajadas bajo el sistema LC (Nardón et al., 2021).

Cabe señalar que el girasol (*H. annuus.*) es el cuarto cultivo más importante en América del Sur. Los principales productores son Argentina y Paraguay, además, Argentina es el segundo mayor exportador de girasol después de Ucrania. Según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (United States Department of Agriculture [USDA], 2023) solo Argentina produjo 3,4 millones de toneladas métricas en la temporada 2021/2022.

El sistema NL requiere maquinaria muy pesada, por ejemplo: sembradoras pesadas (10-20 Mg) y tractores de 8 a 15 Mg. Estos pesos producen, según Botta et al. (2009), compactación de la capa superficial y del subsuelo. Con respecto al sistema de LC, la maquinaria utilizada por el agricultor argentino promedio produce intensidades de tránsito que oscilan entre 20 y 25 Mg km ha<sup>-1</sup> durante la preparación de la cama de siembra. Esto representa aproximadamente el 25 % del tráfico total de este sistema. La complejidad de esta situación radica en que este movimiento de maquinaria se produce después de haber realizado la labranza primaria y secundaria, precisamente en el momento en que el suelo es mecánicamente menos estable y muy susceptible a la compactación.

Hace veinte años, Håkansson et al. (2002) encontraron que la germinación y emergencia de los cultivos dependía principalmente de los métodos de preparación de la cama de siembra. Estos mismos autores definieron la cama de siembra como una superficie suelta y generalmente poco profunda, labrada durante su preparación, indicando que la base de dicha cama de siembra debe ser generalmente firme.

En el mismo orden, la distribución espacial de los residuos de cosecha sobre la superficie del suelo trabajado bajo no-labranza no es uniforme. En consecuencia, se pueden formar áreas de diferentes temperaturas, perjudicando la germinación y emergencia de los cultivos, lo que no ocurre cuando el suelo se trabaja bajo LC ya que el suelo se removió previamente durante la preparación de la cama de siembra (Håkansson et al. 2002).

En NL los residuos superficiales retrasan el secado y reducen la temperatura del suelo, al limitar el aporte de energía, dichos efectos resultan principalmente de la intercepción y reflexión de la radiación incidente. Luego, la emergencia de las plántulas se ve afectada por la presencia de residuos de cosecha y la compactación del suelo,

lo que reduce su temperatura, por lo tanto, se requiere una mayor densidad de siembra para lograr la misma población de plantas que se obtiene en suelos trabajados bajo LC (Botta et al., 2009).

Se debe tener en cuenta que cuando un suelo compactado presenta valores de densidad aparente seca (Das) >1,5 Mg m<sup>-3</sup>, las raíces de cultivos muestran tasas de crecimiento reducidas (Botta et al., 2004), en consecuencia, también se producen reducciones en el rendimiento de los cultivos.

Para Raper (2005), la degradación del suelo producida por el tráfico de maquinaria se puede notar de dos maneras. Primero, podría observarse como una deformación de la superficie del suelo y segundo, podría observarse como algo oculto bajo tierra. En cualquier caso, el tráfico de maquinaria puede reducir el rendimiento del cultivo al producir una condición mecánica del suelo fuertemente compactada que perjudica el crecimiento de las plantas. Además, la carga por rueda está directamente relacionada con la compactación del subsuelo (Antille et al., 2019).

En referencia al cultivo de girasol, Botta et al. (2018) demostraron que cuando el índice de cono del subsuelo fue > 2,0 a 2,5 Mpa se redujo el crecimiento de las raíces de este cultivo y esto provocó una disminución significativa del rendimiento del mismo. Además, siguiendo con los mismos autores, la compactación del suelo por el tráfico repetido de tractores, cosechadoras, carros de granos y sembradoras también produce, principalmente, una reducción significativa en la distribución de los poros del suelo y, en consecuencia, la infiltración de agua en el mismo. Por estos motivos durante la cosecha del cultivo de girasol es importante tener en cuenta el contenido de agua del suelo (Cas) al momento de realizar la labor y también se debe tratar de reducir la compactación del subsuelo provocada por la maquinaria agrícola pesada utilizada en estas operaciones.

Teniendo en cuenta esta situación y el aumento constante de la superficie cultivada de girasol en todo el mundo, tanto en sistemas de no-labranza como en labranza convencional, y considerando que existe escasez de información sobre este aspecto particular del efecto del tráfico agrícola en el suelo y la producción de cultivo de girasol, creemos que llenar este vacío de información puede ser una contribución importante.

Los objetivos de este trabajo fueron: a) cuantificar los efectos del tránsito de la maquinaria agrícola en dos condiciones de suelo mecánicamente diferentes (NL y LC) y b) evaluar el efecto del

tráfico sobre el rendimiento del cultivo de girasol.

De los antecedentes recopilados, surgen dos hipótesis de trabajo y estas fueron: (H1) independientemente del tráfico recibido la emergencia del girasol es más temprana en el suelo trabajado bajo labranza convencional (LC) que en el suelo trabajado bajo no-labranza (NL) continua; y (H2) altas cargas por eje causan mayor aumento en la compactación del subsuelo que bajas cargas por eje con mayor desplazamiento de tránsito sobre el suelo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Sitio experimental

El ensayo se realizó en la Región Pampeana Oeste (35°58'53,63"S, 62°35'12,64"O), en el departamento de Trenque Lauquen, Argentina, durante tres temporadas de cultivo, entre 2013 y 2016, sobre un suelo Hapludol éntico (Soil Survey Staff, 2014). El historial de manejo del lote antes del experimento fue una rotación de cultivos siguiendo un patrón muy estándar en la región para el trigo (*Triticum aestivum* L.), seguido de la soja (*Glycine max* L.), un breve barbecho invernal y luego el girasol (*H. annuus*). En la Tabla 1 se muestra las características típicas del perfil del suelo.

La Tabla 2 muestra los datos meteorológicos entre el 1 de octubre y el 31 de marzo para cada temporada de crecimiento. La estación meteorológica se ubicó a una distancia de 1 km de la finca donde se realizó este estudio. En el partido de Trenque Lauquen, los veranos son cálidos y húmedos y los inviernos son fríos y secos. A lo largo del año, las temperaturas medias oscilan generalmente entre los 2 °C y los 30 °C.

La estación cálida dura 4 meses, de noviembre a febrero, con una temperatura máxima diaria promedio superior a los 25 °C. Enero es el mes más cálido del año con una temperatura máxima promedio de 32 °C y una mínima de 19 °C. La estación fría dura 3 meses, de junio a agosto, con una temperatura máxima diaria promedio inferior a 15 °C; el mes de julio es el mes más frío del año con una temperatura mínima promedio de 3 °C. En cuanto a las precipitaciones, existen dos estaciones bien definidas. La temporada de lluvias dura aproximadamente 8 meses, de septiembre a abril. Enero es el mes con mayor precipitación, pero la distribución es muy irregular. Por ejemplo, durante la segunda temporada de este ensayo, hubo una precipitación de 255 mm en 2 días (1 y 2 de febrero de 2015). Además, en la tercera temporada, la precipitación fue de 136 mm en un solo día (31 de diciembre de 2015). Finalmente, la temporada más seca dura casi 4 meses, de mayo a agosto, con julio como el mes más seco.

### Variables experimentales medidas

El contenido de agua del suelo (Cas) (% p/p) (Ministry of Agriculture, Fisheries and Food [MAFF], 1986), la densidad aparente seca (Das) (Erbach, 1987), el índice de cono (IC) (American Society of Agricultural and Biological Engineers [ASABE], ASAE Standard EP542.1, 2019) y la infiltración de agua en el suelo (Ias) se midieron en el momento de la siembra cada año en lugares aleatorios en todas las parcelas después de los eventos de tráfico. También se midió la emergencia de plántulas de girasol (EpG) por metro cuadrado en todas las hileras y huellas de tractor. La muestra de EpG estuvo compuesta por 320 observaciones en cada caso (huella e hileras) (40 observaciones/hileras x 8 hileras y lo mismo para la huella). El conteo de EpG se realizó a los 11, 15 y 22 días después

**Tabla 1.** Características del suelo en el sitio de estudio

Determinación	Intervalo de profundidad (mm)			
	0-150	150-300	300-650	650-1200
Carbono orgánico (g kg <sup>-1</sup> )	12,30 ± 5,2	6,70 ± 1,2	5,20 ± 1,4	N/A
Arcilla (g kg <sup>-1</sup> ), fracción <2 µm	173 ± 3,21	304 ± 2,50	190 ± 2,40	67 ± 2,31
Limo (g kg <sup>-1</sup> ), fracción 2-50 µm	318 ± 3,02	280 ± 2,31	210 ± 2,33	305 ± 1,61
Arena (g kg <sup>-1</sup> ), fracción >50 µm	509 ± 2,16	416 ± 2,11	600 ± 2,27	628 ± 2,01
pH en H <sub>2</sub> O (1:2,5)	6,2 ± 0,04	6,3 ± 0,02	6,4 ± 0,02	6,7 ± 0,01

**Tabla 2.** Datos meteorológicos para las tres temporadas de crecimiento del cultivo de girasol (01/10/2013 al 31/03/2016)

Temporadas de crecimiento	Temp. Max. (°C)	Temp. Min. (°C)	Temp. Media (°C)	Precipitación Total (mm)	Radiación Solar (kJ cm <sup>2</sup> )
01/10/2013 a 31/03/2014	35,2	2,8	20,1	575,4	402,3
01/10/2014 a 31/03/2015	34,2	3,5	19,2	520,2	387,0
01/10/2015 a 31/03/2016	36,3	2,1	19,1	672,2	392,0

de la siembra. Para cuantificar el rendimiento del girasol (RG) se tomaron 20 muestras (n = 20) en ubicaciones aleatorias dentro de las parcelas experimentales utilizando el método propuesto por Botta et al. (2022). Es importante indicar que el grano fue cosechado con un contenido de humedad del 14 % (p/p).

Los datos de la Das y el Cas fueron promedio de 20 mediciones (n = 20) y se midieron a intervalos de 50 mm y promediadas a 150 mm hasta una profundidad de 450 mm usando cilindros de 50 mm de diámetro por 50 mm de largo.

El IC se midió con un penetrómetro registrador de datos Scout 900 FieldScout™ (Spectrum Tech. Inc., Aurora, EE. UU.). Cada dato es el promedio de 20 muestras (n = 20) tomadas en cada parcela a intervalos de 25 mm y promediadas a 150 mm hasta una profundidad de 450 mm. Cabe señalar que las mediciones de IC y Cas (n = 20) hasta una profundidad de 450 mm se tomaron para usar Cas como una co-variable para tener en cuenta el efecto de Cas en la resistencia del suelo (Ayers y Perumpral, 1982; ASABE, 2019) y, finalmente para todas las mediciones, el número de repeticiones aseguró que se pudiera capturar la variabilidad espacial dentro de las parcelas experimentales (Cassel, 1982). La infiltración (las) se determinó mediante el método del infiltrómetro de anillo. Los anillos tenían 0,25 m de diámetro y 0,4 m de altura y se insertó 0,20 m de profundidad en el suelo para evitar pérdidas por filtraciones laterales. La media de la infiltración se determinó a partir de 20 lugares por parcela según propuesta de Botta et al. (2018).

Antes de la siembra se midió, como variable explicativa, la cobertura de residuos de vegetales en la superficie del suelo (en suelo trabajado bajo NL) de acuerdo con Gargicevich (1995) y se informó un promedio de 96,5 % (desvío estandar: 6,1 %).

**Tratamientos experimentales y maquinaria agrícola**

Se utilizaron dos regímenes de labranza (tratamientos) que representan las diferentes situaciones mecánicas del suelo. El tratamiento 1 (T1) consistió en NL durante 21 años consecutivos. Este es un sistema de uso común en la región de estudio que consta de una pulverizadora y una sembradora para NL. El tratamiento 2 (T2) consistió en LC durante 37 años. Este sistema incluye la labranza primaria realizada con un arado escarificador de cinceles de arrastre con 15 arcos curvos de 25 mm x 20 mm operado a una profundidad de 225 mm y a una velocidad de 6,5 kmh<sup>-1</sup>, seguido de una rastra de discos (700 N/disco, 34 discos) a una profundidad de 150 mm, una rastra de dientes de nueve cuerpos y rodillo desterronador. Finalmente se siembra con una sembradora de girasol para LC. Es importante destacar que el equipo de cosecha es similar para NL y LC.

Las secuencias de uso de las maquinarias de cada sistema de labranza, el peso total, el número de pasadas y el desplazamiento total sobre el terreno de las mismas, incluyendo la labor de siembra, se pueden ver en la Tabla 3.

Para realizar el ensayo se utilizó el diseño propuesto por (Botta, Nardón y Guirado-Clavijo, 2022) por el cual se determinaron aleatoriamente ocho parcelas de 100 x 7 metros con cuatro repeticiones para cada tratamiento de labranza y se separaron por zonas de amortiguamiento de 20 m, evitando así la interacción entre tratamientos. La siembra y la cosecha se realizaron en las fechas habituales en el área de estudio.

Las semillas de girasol se sembraron teniendo en cuenta los tiempos (fechas) de tratamientos y medidas de suelo adoptadas por Botta et al. (2018), considerando que el área de estudio se encontraba en el hemisferio sur. Entonces, el

**Tabla 3.** Tratamientos de labranza y maquinaria utilizada

Tratamientos	Maquinaria utilizada	Numero de pasadas-ha <sup>-1</sup>	Peso total <sup>a</sup> (kN)	Desplazamiento total <sup>a</sup> (km ha <sup>-1</sup> )
No-Labranza (NL)	Pulverizadora (pre-siembra) y sembradora para siembra directa	2	278,2	3,55
Labranza Convencional (LC)	Arado Escarificador de cinceles con 15 curvos, Rastra de discos (700 N/disk, 40 discos), rastra de dientes de nueve secciones y rodillo desterronador y la sembradora de LC.	5	121,0	7,89

a ) El peso declarado es el peso total con carga hasta la siembra inclusive.

girasol fue sembrado el 14 de octubre de 2013 en el primer año del estudio; el 16 de octubre de 2014 en el segundo año y el 15 de octubre de 2015 en el tercer año. La densidad de siembra fue de cinco plantas por metro cuadrado y la profundidad de siembra de 30 mm (Vega y Andrade, 2009), como práctica agronómica estándar de la región y se fertilizó con 40 kg ha<sup>-1</sup> de fosfato di- amónico. En las tres temporadas de cultivo estudiadas, la semilla de girasol utilizada fue: DK4065 de Syngenta, Basilea, Suiza, <https://www.syngenta.com.ar/dk4065> (consultado el 4 de febrero de 2023). Es importante señalar que el cultivo de girasol fue regado en los períodos críticos cuando fue necesario. Para determinar con exactitud los períodos de desarrollo del cultivo se utilizó la clasificación de los estados fenológicos de Schneiter y Miller (1981). Según Días Zorita et al. (2003) los períodos críticos, en cuanto a la disponibilidad de agua, son tanto a la siembra así como unos 10 días antes de floración y hasta un mes después de floración, períodos que definen el número de granos. El estrés hídrico limita la fecundación e inicio de formación de los granos y su número potencial. Todos estos son procesos con limitada posibilidad de compensación posterior durante el llenado. Además, según el mencionado autor la falta de agua a la siembra e implantación del cultivo es crítica porque allí es cuando se define no sólo el número de plantas sino la profundidad explorable por las raíces lo que da a entender que es más importante la continuidad del perfil húmedo que la cantidad de agua en el suelo.

Sobre la base de lo anterior y al balance en el ciclo entre evapotranspiración del cultivo (Etc) y precipitación efectiva, se calculó el déficit hídrico, se programaron las necesidades de riego del girasol y se determinó la utilización de láminas de reposición de 4 mm cada 2 días.

La cosecha de girasol se realizó el 26 de marzo de 2014, 20 de marzo de 2015 y 27 de marzo de 2016 para la primera, segunda y tercera temporada de estudio respectivamente. El rendimiento de girasol se determinó utilizando el método propuesto por Tolón Becerra et al. (2011). Para controlar los efectos de los extremos de las hileras y las hileras laterales, se descartaron los datos de los primeros y últimos 10 m de cada parcela y de cada una de las hileras laterales. Se contó el número de plantas emergidas por metro lineal para todos los surcos a los 11, 15 y 22 días después de la siembra siguiendo el método utilizado por Nardón et al. (2021).

Previo al inicio de este estudio se renovó la maquinaria del establecimiento donde se realizó este experimento (tractor, sembradoras, pulverizadora,

cosechadora y carro de granos). Este equipo es el usado comúnmente por los productores de la zona de estudio, sin embargo, es considerablemente más pesado que el utilizado en forma previa a este ensayo y fue adaptado a la propuesta por Botta et al. (2022). Es importante señalar que se utilizaron dos sembradoras diferentes: la sembradora 1 se usó para el tratamiento de NL y la sembradora 2 se usó para el tratamiento de LC. En la tabla 4 se puede ver, en detalle, las características de los equipos utilizados.

El peso de cada una de las máquinas utilizadas en este ensayo se determinó con una balanza electrónica. Las presiones medias de los neumáticos en el área de contacto rueda/suelo se midieron con un sensor de presión Tekscan® (<https://www.tekscan.com/>). Las operaciones de cosecha fueron las mismas para ambos tratamientos y la única máquina que transitó el terreno durante esta labor fue la cosechadora que realizó la descarga sobre el carro de granos en las cabeceras de las parcelas de ensayo de acuerdo con la metodología descrita en Botta et al. (2007).

### **Análisis estadístico**

Los datos de IC, Das, las, RG y EpG se sometieron a análisis de varianza (ANOVA) y las medias se separaron mediante la prueba de rango múltiple de Duncan ( $p > 0,01$ ) utilizando el software Statgraphics (2009). El contenido de agua del suelo, expresado gravimétricamente, se determinó simultáneamente y se usó como una co-variable de los datos de resistencia a la penetración del suelo debido a sus efectos sobre la resistencia del suelo (ASABE, 2019).

### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En la Tabla 2, se pudieron ver los datos meteorológicos en el sitio de ensayo durante las tres temporadas de crecimiento de este estudio. La temperatura máxima promedio del aire fue alta durante los meses de octubre, noviembre, diciembre, febrero y marzo (período de desarrollo del cultivo de girasol en el hemisferio sur), superando los 34 °C en las tres temporadas de crecimiento estudiadas. Esta situación, junto con la irregularidad de las precipitaciones, generó estrés hídrico y térmico en etapas importantes del crecimiento de los cultivos según Villalobos y Ritchie (1992). Por ejemplo, durante la segunda y tercera temporada de este ensayo, la precipitación fue muy irregular, tal como se detalló en el capítulo de materiales y métodos. Por esta razón, como



**Tabla 4:** Especificaciones de los equipos utilizados en el ensayo

	<b>Tractor FWA</b>	<b>Cosechadora</b>	<b>Pulverizadora</b>	<b>Carro de granos</b>
Potencia Motor (CV/kW)	145 (106)	275/201,6	142/104,13	-----
Rodados delanteros	16.9R 38	800/65R32	12.4-36	24.5 R32
*Presión de inflado (kPa)	70	114	285	120
(Ruedas delanteras)				
Rodados traseros	24.5R32	18.4 R26	12.4-36	24.5 R32
* Presión de inflado (kPa)	65	170	285	120
(Ruedas Ruedas traseras)				
Peso total (kN)	79,80	152	108,7	196
Peso eje delantero (kN)	31,75	98,80	43,48	98,00
Peso eje Trasero (kN)	48,05	53,2	65,22	98,00
Peso por rueda delantera (kN)	15,87	49,40	21,74	49,00
Peso por rueda Trasera (kN)	24,02	26,66	32,61	49,00
Trocha ruedas delanteras (kN)	2800	3200	2100	2800
Trocha ruedas traseras (kN)	2800	3000	2100	2800
Presión área de contacto rueda delantera/suelo (kPa)	41,21	52,65	228	77,50
Presión área de contacto rueda trasera/suelo ( kPa)	43,65	58,42	249	77,50
		<b>Sembradora 1 (NL)</b>	<b>Sembradora 2 (LC)</b>	
Peso total (kN)		69,70	7,80	
Ancho total (m)		9,50	4,20	
Dispositivo dosificador		Pneumatic vacuum distribution	Standard disc with 18 holes	
Ruedas		400/60–15.5	12.4 - 28	
Presión área de contacto rueda/suelo (kPa)		96,50	80,20	
Tren de siembra		Mono disco abre-surco con rueda limitadora de profundidad y cuchilla turbo	Doble disco abre-surco con doble rueda limitadora de profundidad.	
Tapadores		Rueda tapadora	Rueda tapadora	

\*La presión de inflado de los neumáticos corresponde a la recomendada por el fabricante para el peso y la velocidad de trabajo.

se indicó, en dicho capítulo, se decidió regar si el periodo de estrés hídrico era crítico para el crecimiento normal del cultivo. La temperatura y su efecto sobre el crecimiento del girasol han sido ampliamente estudiados, de hecho, según Sadras et al. (2009) su influencia tiene un impacto en la fase vegetativa, la formación de hojas y las tasas de expansión, así como en el número de días entre la emergencia y la fase reproductiva. En cuanto a la radiación solar, los valores de este parámetro fueron uniformes para el periodo de estudio. Este dato es importante ya que el fotoperíodo influye en el tiempo entre la brotación y la floración del girasol (Villalobos et al.,1996).

Por lo visto en los párrafos anteriores, entendemos que las condiciones ambientales que influyen en la germinación, crecimiento y desarrollo del cultivo de girasol fueron bastante similares durante el periodo de estudio, así como el manejo del cultivo. Por lo tanto, consideramos que las diferencias en el comportamiento del cultivo podrían deberse a las condiciones mecánicas

del suelo y la maquinaria utilizada para cada tratamiento.

Durante el tránsito de maquinaria agrícola en las dos condiciones mecánicas del suelo estudiadas (NL y LC), el Cas promedió durante las tres estaciones de crecimiento: 18,7 % ± 1,47 % en base seca entre 0 y 150 mm de profundidad, 19,2 % ± 1,03 % entre 150 y 300 mm de profundidad y 20,2 % ± 1,02 % entre 300 y 450 mm de profundidad. Al no haber diferencias significativas en el Cas (p > 0.01) entre los tratamientos se consideró que las diferencias ocurridas, como ya se manifestó, se debieron a los tratamientos.

Al analizar los parámetros de Das e IC, es importante destacar que en todo el perfil de suelo considerado (0 a 450 mm) hubo diferencias significativas de estos parámetros respecto a la situación inicial encontrada (previo al tráfico) en los dos tratamientos de labranza.

Si se observa la Tabla 5 se puede ver que en el intervalo de profundidad de 0 a 150 mm (nivel superficial), la Das inicial (previo al tráfico de

la maquinaria) del tratamiento de NL tuvo un promedio de  $1,52 \pm 0,17 \text{ Mg m}^{-3}$  y, por debajo de esta profundidad el valor de este parámetro llegó a un promedio de  $1,60 \pm 0,10 \text{ Mg m}^{-3}$  y de  $1,55 \pm 0,12 \text{ Mg m}^{-3}$  para los intervalos 150 a 300 y 300 a 450 mm respectivamente. En referencia al tratamiento de LC (Tabla 6) los valores de este parámetro al inicio del ensayo fueron muy inferiores a los de NL, por ejemplo: el Das inicial del tratamiento de LC, a nivel superficial, fue de  $1,16 \pm 0,21 \text{ Mg m}^{-3}$  y, por debajo de los 150 mm de profundidad (150 a 450 mm) los valores no superaron de  $1,37 \text{ Mg m}^{-3}$ .

En cuanto a los valores de IC, al igual que los valores de Das, tomados previos al tránsito de la maquinaria (situación inicial) estos fueron siempre inferiores para el tratamiento LC respecto al NL siguiendo una tendencia similar a los valores de Das para ambos tratamientos. Fue así como los promedios de los valores de IC a nivel superficial fueron de  $1,10 \pm 0,15 \text{ MPa}$  y  $2,16 \pm 0,32 \text{ MPa}$  para

LC y NL, respectivamente. A nivel subsuperficial los valores de este parámetro llegaron a máximos de  $1,66 \pm 0,11 \text{ MPa}$  y de  $2,50 \pm 0,29 \text{ MPa}$ , para LC y NL respectivamente.

Tanto los datos de Das, tomados en forma previa y posterior al tráfico de la maquinaria en el tratamiento NL (Tabla 5) arrojaron valores de Das superiores a  $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ . Este valor es considerado como limitante al crecimiento de las raíces en suelos de texturas medias a pesadas (p. ej., Molisoles, Vertisoles) (Pilatti y de Orellana, 2000; Botta et al., 2004; Arvidsson y Håkansson, 2014; Antille et al., 2016). En la misma tabla se puede ver que los valores de IC, tomados en forma previa y posterior al tráfico, en todo el perfil de suelo trabajado bajo NL, superó los 2 MPa informado por Pilatti y de Orellana (2000) como causante de la disminución significativa en la tasa de elongación de las raíces del cultivo de soja sembrado en suelos Molisoles. Este valor de IC (2 MPa) se consideró como el límite

**Tabla 5.** (A) Valores de densidad aparente seca del suelo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ) en la situación inicial y luego del tráfico de maquinaria agrícola para el tratamiento NL en tres temporadas de crecimiento. (B) Valores de índice de cono (MPa) en la situación inicial y luego del tráfico de maquinaria agrícola para el tratamiento NL en tres temporadas de crecimiento

<b>(A) Valores de Densidad aparente seca (<math>\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}</math>) No-labranza (NL)</b>				
Prof. (mm)	1 <sup>ra</sup> Temporada de Crecimiento	2 <sup>da</sup> Temporada de Crecimiento	3 <sup>ra</sup> Temporada de Crecimiento	Situación inicial
<b>0 - 150</b>	$1,62 \pm 0,16$ b	$1,63 \pm 0,13$ b	$1,68 \pm 0,23$ b	$1,52 \pm 0,17$ a
<b>150 - 300</b>	$1,68 \pm 0,10$ b	$1,68 \pm 0,18$ b	$1,68 \pm 0,15$ b	$1,60 \pm 0,10$ a
<b>300 - 450</b>	$1,65 \pm 0,10$ b	$1,67 \pm 0,10$ b	$1,64 \pm 0,15$ b	$1,55 \pm 0,12$ a
<b>(B) Valores de Índice de cono (MPa) No-labranza (NL)</b>				
Prof. (mm)	1 <sup>ra</sup> Temporada de Crecimiento	2 <sup>da</sup> Temporada de Crecimiento	3 <sup>ra</sup> Temporada de Crecimiento	Situación inicial
<b>0 - 150</b>	$2,33 \pm 0,25$ b	$2,53 \pm 0,34$ c	$2,73 \pm 0,20$ d	$2,16 \pm 0,32$ a
<b>150 - 300</b>	$2,71 \pm 0,20$ b	$2,87 \pm 0,29$ c	$3,06 \pm 0,31$ d	$2,50 \pm 0,29$ a
<b>300 - 450</b>	$2,55 \pm 0,31$ b	$2,72 \pm 0,27$ c	$2,92 \pm 0,30$ d	$2,10 \pm 0,22$ a

**Tabla 6.** (A) Valores de densidad aparente seca del suelo en la situación inicial y luego del tráfico de maquinaria agrícola para el tratamiento LC en tres temporadas de crecimiento. (B) Valores de índice de cono (MPa) en la situación inicial y luego del tráfico de maquinaria agrícola para el tratamiento LC en tres temporadas de crecimiento

<b>(A) Valores de Densidad aparente seca (<math>\text{Mg}\cdot\text{m}^{-3}</math>) Labranza Convencional (LC)</b>				
Prof. (mm)	1 <sup>ra</sup> Temporada de Crecimiento	2 <sup>da</sup> Temporada de Crecimiento	3 <sup>ra</sup> Temporada de Crecimiento	Situación inicial
<b>0 - 150</b>	$1,31 \pm 0,15$ b	$1,43 \pm 0,10$ c	$1,48 \pm 0,20$ c	$1,16 \pm 0,21$ a
<b>150 - 300</b>	$1,45 \pm 0,18$ b	$1,55 \pm 0,20$ c	$1,58 \pm 0,16$ c	$1,37 \pm 0,13$ a
<b>300 - 450</b>	$1,43 \pm 0,10$ b	$1,51 \pm 0,09$ c	$1,56 \pm 0,11$ c	$1,35 \pm 0,15$ a
<b>(B) Valores de Índice de cono (MPa) No-labranza (NL)</b>				
Prof. (mm)	1 <sup>ra</sup> Temporada de Crecimiento	2 <sup>da</sup> Temporada de Crecimiento	3 <sup>ra</sup> Temporada de Crecimiento	Situación inicial
<b>0 - 150</b>	$1,47 \pm 0,11$ b	$1,60 \pm 0,10$ c	$1,76 \pm 0,17$ d	$1,10 \pm 0,15$ a
<b>150 - 300</b>	$1,85 \pm 0,12$ b	$1,89 \pm 0,16$ c	$2,32 \pm 0,14$ d	$1,66 \pm 0,11$ a
<b>300 - 450</b>	$1,73 \pm 0,10$ b	$1,81 \pm 0,09$ c	$1,91 \pm 0,08$ c	$1,63 \pm 0,09$ a

Medias con diferentes letras en sentido horizontal indican que hay diferencias significativas ( $p > 0,01$ ).



crítico de enraizamiento (Pilatti et al., 2003; Ramos, et al., 2010), pero diferentes umbrales (rango: de 0,8 a 5,0 MPa) también se han informado para otros tipos de suelo y especies de plantas (e.g., Bengough y Mullins, 1990; Unger y Kaspar, 1994; Tuzzin de Moraes, et al., 2018). El valor de Das de 1,05 Mg m<sup>-3</sup> indicado por Soane et al. (1983) como límite para evitar la disminución del rendimiento en la producción de granos también fue superado en el suelo trabajado bajo LC en todo el perfil (0 a 450 mm). Lo mismo ocurrió con el parámetro IC, donde todos los valores en el perfil estudiado superaron los 1,2 MPa, valor que produjo, según Botta et al. (2004) disminución del rendimiento del cultivo de soja siendo, este un cultivo, menos susceptible a la compactación del suelo que el cultivo de girasol.

De todas maneras, lo destacado de la situación es que los valores de IC en el intervalo de 0 a 150 mm de profundidad en NL, durante los 3 años de estudio, fueron superiores al valor de 2 MPa, también, informado por Pilatti y de Orellana (2000) como limitante para el desarrollo normal de las raíces.

Estos elevados valores de IC y Das, en especial en el intervalo de 0 a 150 mm, pudieron haber sido una de las causas por las que la germinación y posterior emergencia de las semillas de girasol fuera más lenta en el suelo trabajado en NL que en el suelo trabajado en LC. Esto se puede constatar en la Tabla 7, donde hay diferencias significativas en todas las mediciones realizadas entre los 11 y los 22 días posteriores a la siembra entre los tratamientos de NL y de LC.

Este retraso en la emergencia del girasol no coincide con los resultados obtenidos por Botta et al. (2022) para cultivos de soja y trigo después de 22 días ya que, en estos casos, estos dos cultivos no mostraron diferencias significativas en la emergencia de semillas en los sistemas LC y NL. Coincidiendo con Solhjou et al. (2012), esta situación se puede deber a que en los sistemas NL se utilizan herbicidas pre-emergentes no-selectivos que agudizan los problemas de toxicidad porque el tránsito de la maquinaria se realiza sobre el suelo cargado de estos herbicidas.

Ante esto, junto a la presencia de residuos vegetales sobre la superficie, los discos abre-surcos de los trenes de siembra tienen dificultades para abrir los surcos y colocar correctamente la semilla. Para poder resolver este inconveniente las sembradoras de NL están equipadas con cuchillas llamadas "labra-surcos" (ubicadas delante de los discos abre-surcos) que retiran de la hilera los restos vegetales. No obstante, esto produce un excesivo desplazamiento lateral del suelo, lo que, coincidiendo con Nardón et al. (2021), frustra el propósito del sistema NL y sumaría una dificultad más en algunos suelos, el correcto tapado de las semillas de girasol.

Siguiendo con los intervalos más profundos, los mayores valores de Das e IC para NL y LC luego del tráfico de las maquinarias, se midieron en el intervalo de profundidad de 150 a 300 mm. Los valores máximos de Das e IC en estos intervalos fueron 1,68 ± 0,15 Mg·m<sup>-3</sup> y 3,06 ± 0,31 para NL y de 1,58 ± 0,16 Mg·m<sup>-3</sup> y 2,32 ± 0,14 MPa para LC (ver Tablas 5 y 6). Todos los valores excedieron los citados como críticos para el impedimento del crecimiento de las raíces y reducción de rendimientos en cultivos anuales (Soane et al., 1983; Botta et al., 2004; Arvidsson y Håkansson, 2014).

En cuanto a la respuesta del suelo al tráfico de maquinaria agrícola en el nivel de 300 a 450 mm de profundidad se encontró que los valores de IC y Das aumentaron respecto a la situación inicial y se diferenciaron significativamente de la misma. A pesar de ello, en este intervalo de profundidad, no se observaron valores mayores de Das e IC que en el intervalo de 150 a 300 mm de profundidad.

Respecto a la infiltración de agua en el suelo (las), esta se vio significativamente afectada por el diferente estado de compactación inicial de los tratamientos (Tabla 8) y el efecto, sobre este parámetro, fue proporcional a la intensidad del tráfico aplicada, lo cual fue consistente con otros estudios en suelos livianos (p. ej., Usman, 1994; Chyba et al., 2014). Hay que tener en cuenta que esta es una consideración práctica importante para la conservación del agua en regiones semiáridas,

**Tabla 7.** Emergencia de plántulas de girasol (plantas por metro cuadrado) a los 11, 15 y 22 días después de la siembra en tres temporadas de cultivo

	1 <sup>ra</sup> Temporada de Crecimiento			2 <sup>da</sup> Temporada de Crecimiento			3 <sup>ra</sup> Temporada de Crecimiento		
	Días desde la siembra			Días desde la siembra			Días desde la siembra		
	11	15	22	11	15	22	11	15	22
No-Labranza	0,5 a	1,3 a	2,4 a	0,4 a	1,2 a	2,3 b	0,4 a	1,1 a	2,2 b
Labranza Convencional	1,1 b	1,9 b	3,2 b	1,2 b	2,1 b	3,2 b	1,2 b	2,2 b	3,1 b

Valores medios con letras diferentes entre regímenes de labranza son significativamente diferentes (P < 0,01) Prueba de rangos múltiples de Duncan.

como la pampa occidental, que dependen de la lluvia y el almacenamiento de agua en el suelo para el establecimiento exitoso de los cultivos.

En cuanto al peso de la maquinaria, se verificó que los incrementos producidos por el equipo más pesado (NL) sobre las propiedades físicas del suelo medidas (IC y Das) a nivel superficial y subsuperficial fueron mayores que los producidos por el equipo más liviano convencional (equipo para LC). Seguramente, estos resultados se relacionaron con la compactación producida por una alta carga por eje y concuerdan con los de Antille et al. (2016), pero también se relacionan con el número de pasadas de la maquinaria agrícola y el tipo de suelo sobre el que se desplaza.

Aclarando lo anterior, posiblemente la combinación de la alta carga por eje (ver Tablas 3 y 4), el desplazamiento total de la maquinaria (NL = 3,55 y LC = 7,89 km/ha) y la alta presión sobre el suelo de los neumáticos del pulverizador (228 y 249 kPa en neumáticos delanteros y traseros, respectivamente) fueron los causantes de la mencionada situación de compactación subsuperficial en la que hubo un incremento significativo de los parámetros Das e IC a nivel subsuperficial del suelo. Es decir, el bajo desplazamiento sobre el terreno producido por el equipo de NL y su alto peso produjeron valores de compactación mayores que los que produjo el equipo de LC. Sin embargo, el equipo para LC con bajo peso pero con más del doble del desplazamiento sobre el terreno también produjo valores que perjudican, aunque en menor medida, el desarrollo del cultivo. Esto hace que quede abierto un interrogante en cuanto a compactación subsuperficial del suelo: ¿es más importante

disminuir el peso total del equipo o disminuir el peso y desplazamiento del equipo sobre el suelo?. Este interrogante no es menor ya que la compactación subsuperficial se ubica en los niveles más profundos del suelo y es, coincidiendo con Håkansson et al. (2002), la compactación más difícil de solucionar y la que mayor costo tiene para el productor.

En esta cuantificación de los efectos del tráfico sobre el suelo y su consecuencia sobre el rendimiento del cultivo de girasol se puede ver que este cultivo tuvo mayor rendimiento en suelo bajo LC que en el suelo trabajado bajo el sistema de NL (Tabla 9). El rendimiento del cultivo disminuye al aumentar la compactación del suelo debido al tráfico de maquinaria agrícola pero, por los resultados obtenidos, el estado inicial de compactación superficial del suelo (0 a 150 mm) al momento de la emergencia de este cultivo es un punto crítico en el rendimiento final del mismo ya que, probablemente, las semillas de girasol son muy susceptibles a la compactación del suelo en el momento siembra-emergencia. Sin embargo, también hay que tener en cuenta que el rendimiento del girasol mostró una tendencia a la baja con el aumento de la intensidad del tráfico (peso y desplazamiento) junto con la aplicación continua del sistema de NL, teniendo en cuenta que la diferencia en el rendimiento del cultivo de girasol entre los tratamientos, durante los 3 años de estudio, fue significativa ( $p < 0,01$ ) y notablemente superior para tratamiento LC sobre el tratamiento NL (Tabla 9).

Finalmente, con estos resultados, se recomienda que si el productor decide trabajar en forma continua bajo el sistema de no-labranza, realice una

**Tabla 8.** Valores medios ( $n = 20$ ) de infiltración de agua en el suelo ( $\text{mm h}^{-1}$ ) medidos en el rango de 0 a 200 mm de profundidad para cada tratamiento en las tres temporadas de crecimiento

<b>Valores de Infiltración de agua en el suelo (<math>\text{mm h}^{-1}</math>) suelo (LC)</b>				
	1.ª Temporada de Crecimiento	2.ª Temporada de Crecimiento	3.ª Temporada de Crecimiento	Situación inicial
<b>0 - 200 mm</b>	62,34 a	57,81 a	55,76 a	72,01 a
<b>Valores de Infiltración de agua en el suelo (<math>\text{mm h}^{-1}</math>) suelo (NL)</b>				
<b>0 - 200 mm</b>	45,70 b	42,36 b	39,90b	57,10 b

Valores medios con letras diferentes muestran diferencias significativas entre tratamientos LC y NL (verticalmente, dentro de la misma temporada de crecimiento) ( $P < 0,01$ ). Prueba de rangos múltiples de Duncan.

**Tabla 9.** Rendimientos de girasol para los diferentes tratamientos en tres campañas de cultivo ( $\text{ton/ha}$ )

	1.ª Temporada de Crecimiento	2.ª Temporada de Crecimiento	3.ª Temporada de Crecimiento	Promedios
No Labranza	2,13 $\pm$ 0,31 a	2,02 $\pm$ 0,20 a	1,83 $\pm$ 0,19a	1,99 a
Labranza Convencional	3,29 $\pm$ 0,27 b	3,22 $\pm$ 0,25 b	3,18 $\pm$ 0,30 b	3,23 b

Valores medios con diferentes letras entre tratamientos de labranza (sentido vertical) indican que hay diferencias significativas ( $p > 0,01$ ).

planificación de tránsito y manejo de la maquinaria (pesos, presiones de inflado de neumáticos y tipos de neumáticos) que le permita mantenerse por debajo de valores de compactación perjudiciales para el suelo y el cultivo. De lo contrario solo le queda, como decisión, planificar una labor de descompactado, cada cierto período de tiempo, el que depende del tipo de suelo y clima de la región donde se ubica su finca.

## CONCLUSIONES

Debido a la alta intensidad de tráfico aplicada en forma continua al suelo trabajado bajo el sistema de no-labranza, se produjo una condición de alta impedancia mecánica la que afectó la emergencia y el rendimiento del cultivo de girasol.

La compactación del subsuelo fue elevada en el sistema de labranza convencional, aun usando maquinaria de bajo peso, producto del alto número de pasadas durante la totalidad del ciclo del cultivo.

Además, quedó demostrado que aumentando el peso de la maquinaria (por encima de 360 kN) y la presión en el área de contacto rueda/suelo, inclusive en suelos trabajados en no-labranza continua, la compactación subsuperficial llegó a valores donde la única forma de revertirlos es realizando una labor de labranza profunda o descompactado del suelo.

El suelo trabajado bajo labranza convencional es un suelo con bajos niveles de compactación hasta los 150 mm de profundidad.

## BIBLIOGRAFÍA

- American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE, 2019). *ASAE Standard EP542.1 NOV2019: Procedures for Using and Reporting Data Obtained with the Soil Cone Penetrometer*. American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Antille, D. L., Peets, S., Galambošová, J., Botta, G. F., Rataj, V., Macak, M., Tullberg, J. N., Chamen, W. C. T., White, D. R., Misiewicz, P. A., Hargreaves, P. R., Bienvenido, J. F. y Godwin, R. J. (2019). Review: Soil compaction and controlled traffic farming in arable and grass cropping systems. *Agronomy Research*, 17(3), 653-682. <https://doi.org/10.15159/ar.19.133>
- Antille, D. L., Bennett, J. M. y Jensen, T. A. (2016). Soil compaction and controlled traffic considerations in Australian cotton-farming systems. *Crop & Pasture Science*, 67(1), 1-28. <https://doi.org/10.1071/CP15097>
- Arvidsson, J. y Håkansson, I. (2014). Response of different crops to soil compaction—Short-term effects in Swedish field experiments. *Soil & Tillage Research*, 138, 56-63. <https://doi.org/10.1016/j.still.2013.12.006>
- Ayers, P. D. y Perumpral, J. V. (1982). Moisture and Density Effect on Cone Index. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 25(5), 1169-1172. <https://doi.org/10.13031/2013.33691>
- Bengough, A. G. y Mullins, C. E. (1990). Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *European Journal of Soil Science*, 41(3), 341-358. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1990.tb00070.x>
- Botta, G. F., Antille, D. L., Nardon, G. F., Rivero, D., Bienvenido, F., Contessotto, E. E., Ezquerro Canalejo, A. y Ressia, J. M. (2022). Zero and controlled traffic improved soil physical conditions and soybean yield under no tillage. *Soil & Tillage Research*, 215, 105235. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105235>
- Botta, G. F., Jorajuria, D., Balbuena, R. y Rosatto, H. (2004). Mechanical and cropping behaviour of direct drilled soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glycine max* L.) yields. *Soil & Tillage Research*, 78(1), 53-58. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.01.004>
- Botta, G. F., Nardón, G. F. y Guirado Clavijo, R. (2022). Soil Sustainability: Analysis of the Soil Compaction under Heavy Agricultural Machinery Traffic in Extensive Crops. *Agronomy*, 12(2), 282. <https://doi.org/10.3390/agronomy12020282>
- Botta, G. F., Pozzolo, O., Bomben, M., Rosatto, H., Rivero, D., Ressia, M., Tourn, M., Soza, E. y Vázquez, J. (2007). Traffic alternatives in harvest of soybean (*Glycine max* L.): Effect on yields and soil under direct sowing system. *Soil & Tillage Research*, 96(1-2), 145-154. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.05.003>
- Botta, G. F., Tolón Becerra, A. y Bellora Melcón, F. (2009). Seedbed compaction produced by traffic on four tillage regimes in the rolling Pampas of Argentina. *Soil & Tillage Research*, 105(1), 128-134. <https://doi.org/10.1016/j.still.2009.06.005>
- Botta, G. F., Tolón Becerra, A., Bienvenido, F., Rivero, D., Laureda, D., Ezquerro-Canalejo, A. y Contessotto, E. E. (2018). Sunflower (*Helianthus annuus* L.) harvest: Tractor and grain chaser traffic effects on soil compaction and crop yields. *Land Degradation & Development*, 29(12), 4252-4261. <https://doi.org/10.1002/ldr.3181>
- Chamen, W. C. T., Alakukku, L., Pires, S., Sommer, C., Spoor, G., Tijink, F. y Weisskopf, P. (2003). Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 2. Equipment and field practices. *Soil & Tillage Research*, 73(1-2), 161-174. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00108-9)
- Chyba, J., Kroulík, M., Křištof, K., Misiewicz, P. A. y Chaney, K. (2014). Influence of soil compaction by farm machinery and livestock on water infiltration rate

- on grassland. *Agronomy Research*, 12(1), 59-64.
- Díaz Zorita, M., Duarte, G. y Plante, E. (2003). Guía para la producción de girasol en siembra directa, Monsanto, Buenos Aires. Asociación Argentina de Girasol (ASAGIR).
- Erbach, D. C. (1987). Measurement of Soil Bulk Density and Moisture. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 30(4), 922-931. <https://doi.org/10.13031/2013.30500>
- Gargicevich, A. (1995). Sembradoras de siembra directa y su efecto sobre la cobertura. In *Proyecto Agricultura Conservacionista II. Serie Experiencias*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- Gassel, D. K. (1982). Tillage Effects on Soil Bulk Density and Mechanical Impedance. In: Unger, P. W., Van Doren Jr., D. M., Whisler, F. D., Skidmore, E. L. (Eds.), *Predicting Tillage Effects on Soil Physical Properties and Processes*, Chapter 4, Vol. 44, 45-67. Assa Special Publications. <https://doi.org/10.2134/asaspecpub44>
- Godwin, R. J. (1990). Agricultural Engineering in Development: tillage for Crop Production in Areas of Low Rainfall. In *FAO Agricultural Services Bulletin No. 83*. Food and Agricultural Organization of the United Nations.
- Håkansson, I., Myrbeck, A. y Etana, A. (2002). A review of research on seedbed preparation for small grains in Sweden. *Soil & Tillage Research*, 64(1-2), 23-40. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00255-0](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00255-0)
- Håkansson, I. y Reeder, R. C. (1994). Subsoil compaction by vehicles with high axle load—extent, persistence and crop response. *Soil & Tillage Research*, 29(1-2), 277-304. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(94\)90065-5](https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)90065-5)
- Masola, M. J., Alesso, C. A., Carrizo, M. E., Berhongaray, G., Botta, G. F., Horn, R. y Imhoff, S. (2020). Advantages of the one-wheeled tramline for multiple machinery widths method on sunflower (*Helianthus annuus* L.) and maize (*Zea mays* L.) responses in the Argentinean Flat Pampas. *Soil & Tillage Research*, 196, 104462. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104462>
- Ministry of Agriculture, Fisheries and Food (MAFF). (1986). *The Analysis of Agricultural Materials: a manual of the analytical methods used by the Agricultural Development and Advisory Service*, 3rd Ed. Her Majesty's Stationary Office.
- Nardón, G. F., Botta, G. F., Aikins, K. A., Rivero, D., Bienvenido, F. y Antille D. (2021). Seeding System Configuration Effects on Sunflower Seedling Emergence and Yield under No Tillage. *Soil Systems*, 5(4), 72. <https://doi.org/10.3390/soilsystems5040072>
- Pilatti, M. A. y de Orellana, J. A. (2000). The Ideal Soil: II. Critical Values of an "Ideal Soil" for Mollisols in the North of the Pampean Region (in Argentina). *Journal of Sustainable Agriculture*, 17(1), 89-112. [https://doi.org/10.1300/J064v17n01\\_08](https://doi.org/10.1300/J064v17n01_08)
- Pilatti, M. A., de Orellana, J. A. y Felli, O. M. (2003). The Ideal Soil: III. Fitness of Edaphic Variables to Achieve Sustainance in Agroecosystems. *Journal of Sustainable Agriculture*, 22(2), 109-132. [https://doi.org/10.1300/J064v22n02\\_08](https://doi.org/10.1300/J064v22n02_08)
- Ramos, J. C., Imhoff, S. C., Pilatti, M. A. y Vegetti, A. C. (2010). Morphological characteristics of soybean root apices as indicators of soil compaction. *Scientia Agricola*, 67(6), 707-712. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000600013>
- Raper, R. L. (2005). Agricultural traffic impacts on soil. *Journal of Terramechanics*, 42(3-4), 259-280. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.10.010>
- Sadras, V. O., Ferreiro, M., Gutheim, F. y Kantolic, A. G. (2009). Desarrollo fenológico y su respuesta a temperatura y fotoperíodo. En: Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. FH Andrade, VO Sadras (Editores) Tercera Edición ISBN 987-521-047-1, 19-39.
- Schneider, A. A. y Miller, J. F. (1981). Description of Sunflower Growth Stages. *Crop Science*, 21(6), 901-903. <https://doi.org/10.2135/cropsci1981.0011183X002100060024x>
- Soane, B. D., Dickson, J. W. y Campbell, D. J. (1983). Compaction by agricultural vehicles: A Review. III. Incidence and control of compaction in crop production. *Soil & Tillage Research*, 2(1), 3-36. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(82\)90030-7](https://doi.org/10.1016/0167-1987(82)90030-7)
- Solhjou, A., Fielke, J. M. y Desbiolles, J. M. A. (2012). Soil translocation by narrow openers with various rake angles. *Biosystems Engineering*, 112(1), 65-73. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.02.006>
- Soil Survey Staff (2014). *Keys to soil taxonomy* (12th ed.). United States Department of Agriculture Natural Resources Conservation Service.
- Statgraphics (Statistical Software) (2009). Stat Point, Technologies Inc., Herndon, Virginia, USA.
- Tolón Becerra, A., Tourn, M., Botta, G. F. y Lastra Bravo, X. (2011). Effects of different tillage regimes on soil compaction, maize (*Zea mays* L.) seedling emergence and yields in the eastern Argentinean Pampas region. *Soil & Tillage Research*, 117, 184-190. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.003>
- Tuzzin de Moraes, M., Bengough, A. G., Debiasi, H., Franchini, J. C., Levien, R., Schnepf, A. y Leitner, D. (2018). Mechanistic framework to link root growth models with weather and soil physical properties, including example applications to soybean growth in Brazil. *Plant Soil*, 428(1), 67-92. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3656-z>
- Unger, P. W. y Kaspar, T. C. (1994). Soil Compaction and Root Growth: A Review. *Agronomy Journal*, 86 (5), 759-766. <https://doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600050004x>
- United States Department of Agriculture (2022) *Oilseeds and Products Update*. Foreign Agricultural Service, Edited by Global Agricultural Information Network, GAIN. <https://apps.fas.usda.gov/newgainapi/api/Report/DownloadReportByFileName?fileName=Oils>

[eeds%20and%20Products%20Update\\_Buenos%20Aires\\_Argentina\\_01-04-2022.pdf](#)

- Usman, H. (1994). Cattle trampling and soil compaction effects on soil properties of a Northeastern Nigerian sandy loam. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 8(1), 69-75. <https://doi.org/10.1080/15324989309381379>
- Vega, C.R.C.; Andrade, F.H. Densidad de plantas y espaciamento entre hileras. En Bases para el Manejo del Maíz, el Girasol y la Soja. Ediciones: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA, Balcarce,

Argentina, Capitulo IV, ISBN 987 521 047 1, 69–97.

- Villalobos, F. J. y Ritchie, J. T. (1992). The effect of temperature on leaf emergence rates of sunflower genotypes. *Field Crop Research*, 29(1), 37-46. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(92\)90074-J](https://doi.org/10.1016/0378-4290(92)90074-J)
- Villalobos, F. J., Hall, A. J., Ritchie, J. T. y Orgaz, F. (1996). OILCROP SUN: A Development, Growth, and Yield Model of the Sunflower Crop. *Agronomy Journal*, 88(3), 403-415. <https://doi.org/10.2134/agronj1996.00021962008800030008x>