

Efectos y Prevenciones de la Compactación del Suelo en Labranza Convencional: Desafíos y Soluciones Effects and Prevention of Soil Compaction in Conventional Tillage: Challenges and Solutions

Edmundo Hetz¹, Lizardo Reina-Castro² y José Lizardo Reyna-Bowen^{2,3†}

¹ Universidad de Concepción. Víctor Lamas 1290, Casilla 160-C. 4070386 Concepción, Región del Bío, Chile; (E.H.).

² Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí, Manuel Félix López, Campus Politécnico El Limón. Vía Calceta-El Morro, Calceta. 130250 Cantón Bolívar, Manabí, Ecuador; (L.R.C.), (J.L.R.B.).

³ University of Agriculture in Kraków, Faculty of Forestry, Department of Forest Engineering. Al. 29 Listopada 46. 31-425, Krowodrza Kraków, Poland; (J.L.R.B.).

† Autor para correspondencia: jlreyna@espam.edu.ec

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue analizar los mecanismos de compactación en labranza convencional, contribuyendo al conocimiento sobre la caracterización, prevención, reducción y eliminación de la compactación generada por el tráfico de maquinaria agrícola, afectando negativamente la germinación, el desarrollo radicular y, consecuentemente, el rendimiento de los cultivos. Para ello, se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura. Se analizaron 44 artículos científicos publicados en los últimos 20 años, complementados con libros relevantes; la búsqueda de información se realizó en bases de datos como Google Scholar, Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, Taylor & Francis Online, Academia.edu y ResearchGate. Los resultados describen la compactación del suelo, sus factores y efectos, presentando además una cuantificación de los pesos transportados por la maquinaria agrícola y las presiones generadas en la interfaz neumático/suelo. Se exploran diversas técnicas de prevención y mitigación, desde la selección y gestión optimizada de la maquinaria (considerando lastrado, tipos de rodado y uso de agricultura de precisión) hasta la implementación de sistemas de labranza adecuados. Se concluye que, si bien, la compactación es inherente a la agricultura mecanizada, un enfoque integral y proactivo es indispensable para su gestión eficaz, siendo crucial optimizar simultáneamente la presión de contacto de la maquinaria, mejorar la capacidad de carga y estructura del suelo para asegurar una agricultura sostenible.

Palabras clave: *estrés mecánico, estructura del agregado, maquinaria agrícola, productividad agrícola.*

SUMMARY

The objective of this research was to analyze the mechanisms of soil compaction under conventional tillage, contributing to the understanding of its characterization, prevention, reduction, and elimination when generated by agricultural machinery traffic, which negatively affects seed germination, root development, and consequently, crop yield. A systematic literature review was conducted, analyzing forty-four scientific articles published over the last 20 years and complemented with information from relevant textbooks. The search was performed in databases such as Google Scholar, Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, Taylor & Francis Online, Academia.edu, and ResearchGate. The results describe soil compaction, its causal factors and effects, and include a quantification of the loads transported by agricultural machinery and the pressures exerted at the tire-soil interface. Various prevention and mitigation strategies are presented, ranging



Cita recomendada:

Hetz, E., Reina-Castro, L., & Reyna-Bowen, J. L. (2025). Efectos y Prevenciones de la Compactación del Suelo en Labranza Convencional: Desafíos y Soluciones. *Terra Latinoamericana*, 43, 1-14. e2257. <https://doi.org/10.28940/terra.v43i.2257>

Recibido: 16 de marzo de 2025.

Aceptado: 15 de julio de 2025.

Revisión: Volumen 43.

Noviembre de 2025.

Editor de Sección:

Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar

Editor Técnico:

Dr. Marco Antonio Camacho Escobar



Copyright: © 2025 by the authors.

Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC ND) License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

from machinery selection and optimized operation (considering ballasting, tire types, and the incorporation of precision agriculture) to the implementation of appropriate tillage systems. It is concluded that, although compaction is inherent to mechanized agriculture, a comprehensive and proactive approach is essential for its effective management, making it crucial to simultaneously optimize machinery-soil contact pressure and improve soil load-bearing capacity and structure to ensure sustainable agricultural production.

Index words: *mechanical stress, aggregate structure, agricultural machinery, agricultural productivity.*

INTRODUCCIÓN

La agricultura moderna busca optimizar la productividad a través del uso intensivo de tractores y maquinaria agrícola (Zhang y Peng, 2021). Sin embargo, la constante evolución hacia equipos más pesados y potentes, sumada al incremento del tráfico en campo, especialmente en sistemas como los huertos frutales con múltiples pasadas para control de malezas, plagas, cosecha y transporte (Hussain *et al.*, 2021), ha exacerbado un problema crítico: la compactación del suelo (Bhattacharyya *et al.*, 2022).

La compactación de suelo ocurre cuando una carga externa sobrepasa la capacidad de soporte del suelo, resultando en reducción del espacio poroso, disminución de volumen y aumento significativo de la densidad aparente (Lv, Gao, Liao, Zhu y Zhu, 2023; Carrillo-Martínez, Álvarez y Aguilar, 2022). Este es un fenómeno complejo, influenciado por múltiples factores como el contenido de humedad, textura del suelo, peso de la maquinaria, presión del contacto neumático-suelo y número de pasadas (Zhang *et al.*, 2023). Sus efectos pueden manifestarse a nivel superficial, principalmente por la presión de los neumáticos, o en capas más profundas, debido al peso concentrado sobre los ejes más pesados de la maquinaria (Liu *et al.*, 2025).

Debido a sus consecuencias, la compactación del suelo representa una amenaza creciente para la productividad de los agroecosistemas y la seguridad alimentaria al alterar drásticamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Frene, Pandey y Castrillo, 2024). Por tanto, es crucial evaluar la calidad de la labranza mediante el análisis de la distribución de agregados y el uso de parámetros estadísticos avanzados, reconociendo la variabilidad en la respuesta del suelo y la necesidad imperante de nuevas investigaciones y modelos predictivos que permitan mitigar eficazmente sus efectos con soluciones técnicas y prácticas de cultivo (Mileusnić, Saljnikov, Radojević y Petrović, 2022).

Estudios recientes, como el de Peralta, Alvarez y Taboada (2021) no solo reafirman los impactos conocidos de la compactación y la subsolación, sino que también revelan la persistencia de los efectos de la subsolación por 17 meses en la región pampeana y respuesta más favorable de la soja en comparación con el maíz a la labranza profunda sin inversión, indicando potencial significativo para reducir las brechas de rendimiento en monocultivos de secano, siempre y cuando estas prácticas se complementen con estrategias post-labranza, como el uso de cultivos de cobertura y rotaciones diversificadas, para prevenir la recompactación.

A pesar de que los valores críticos de densidad aparente comúnmente aceptados no son directamente aplicables a los Andosoles debido a su inherentemente baja densidad, investigaciones experimentales han demostrado que la compactación inducida en estos suelos (con densidades de 0.65 a 0.85 Mg m⁻³) incrementa su resistencia a la penetración y reduce la macroporosidad, lo que a su vez afecta negativamente la infiltración y la aireación (Dörner *et al.*, 2022). Este problema es particularmente apremiante en América Latina y el Caribe, donde 38% de los suelos están clasificados como no saludables según un nuevo índice desarrollado mediante teledetección y aprendizaje automático, lo que enfatiza la necesidad urgente de implementar políticas de protección y restauración para garantizar la sostenibilidad regional (Poppiel, Cherubin, Novais y Demattê, 2025).

Este trabajo presenta una revisión bibliográfica focalizada en la compactación del suelo en sistemas de labranza convencional. Se complementa con análisis detallado de 127 modelos de tractores y 49 modelos de maquinaria agrícola pesada ampliamente comercializados en Sudamérica, excluyendo específicamente aquellos de alta potencia y gran peso utilizados en la Pampa Húmeda de Argentina. El objetivo de la investigación fue analizar los mecanismos de compactación en labranza convencional, contribuyendo al conocimiento sobre la caracterización, prevención, reducción y eliminación de la compactación generada por el tráfico de maquinaria agrícola. De este modo, se busca proporcionar información práctica y útil para la toma de decisiones en la gestión de la maquinaria agrícola y la conservación del suelo en la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Adaptando la metodología propuesta por Shaheb, Venkatesh y Shearer (2021), para esta revisión se analizaron 44 artículos científicos publicados en los últimos 20 años, complementados con libros relevantes sobre la temática. La búsqueda bibliográfica se realizó utilizando motores de búsqueda clave como Google Scholar, Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online, Taylor & Francis Online, Academia y ResearchGate. La selección incluyó amplia gama de fuentes como revistas indexadas, actas de conferencias y simposios, informes, presentaciones académicas y tesis/disertaciones.

El enfoque principal de esta revisión fue abordar la compactación del suelo y otros problemas derivados del uso de maquinaria pesada, las presiones del suelo y los neumáticos, así como estudios de campo sobre las condiciones del suelo y su impacto en la producción agrícola.

DISCUSIÓN

Con el objetivo de facilitar la comprensión, los resultados más relevantes de esta investigación se han estructurado en secciones y subsecciones. Estas profundizan en la naturaleza de la compactación del suelo, los factores causales, sus efectos principales, e incorporan un análisis exhaustivo de 127 modelos de tractores y 49 modelos de maquinaria agrícola pesada predominantes en el mercado sudamericano, además de las estrategias para su prevención y mitigación.

Descripción de la Compactación del Suelo

La compactación del suelo es un proceso que se caracteriza por aumento de su densidad aparente y consecuente reducción de la macroporosidad (Shaheb *et al.*, 2021). Este fenómeno tiene impacto detrimental en el desarrollo radicular, emergencia de las plántulas, actividad biológica del suelo y su aireación (Mileusnić *et al.*, 2022). Sus consecuencias también incluyen disminución de la infiltración de agua, aumento de la erosión hídrica y riesgo de encharcamientos o inundaciones. En última instancia, se produce reducción de los rendimientos de los cultivos, incremento en la demanda de potencia para las labores de labranza y, por ende, pérdidas económicas para los productores (Pulido-Moncada, Petersen y Munkholm, 2022).

Para la comprensión y cuantificación de la compactación del suelo, se emplean diversos parámetros físicos. Estos indicadores permiten evaluar el grado de alteración de las propiedades edáficas y se definen comúnmente mediante las fórmulas que se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros y fórmulas generales para la cuantificación de la compactación del suelo. No son visibles todos los componentes de las fórmulas.

Table 1. General parameters and formulas for quantifying soil compaction. Not all components of the formulas are visible.

Parámetro	Símbolo	Fórmula	Descripción	Referencia
Densidad aparente	ρ_b	$\rho_b = \frac{M_s}{V_t}$	Relación entre masa de suelo seco y volumen de las partículas sólidas.	(Ren <i>et al.</i> , 2022)
Densidad real de partículas	ρ_s	$\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$	Relación entre masa de suelo seco y volumen de las partículas sólidas	(Ren <i>et al.</i> , 2022)
Porosidad total	ϕ	$\phi = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}$	Fracción del volumen total del suelo ocupada por los poros.	(Shaheb, Venkatesh y Shearer, 2021)
Porosidad de aire o capacidad de aireación	ϕ_a	$\phi_a = \phi - \theta_v$	Volumen de poros llenos de aire en condición específica. Se puede calcular como porosidad total menos contenido de humedad volumétrico.	(Shaheb <i>et al.</i> , 2021)
Permeabilidad al aire	ka	Basada en la Ley de Darcy / modelos complejos (tortuosidad y el tamaño de los poros)	Medida de la facilidad con la que el aire fluye a través del suelo.	(Keller <i>et al.</i> , 2021)
Resistencia a la penetración	PR	$PR = \frac{F}{A_c}$	Presión requerida para que un cono penetre el suelo; fuerza aplicada dividida por el área del cono.	(Lardy, DeSutter, Daigh, Meehan y Staricka, 2022)

La compactación del suelo constituye un proceso elastoplástico complejo que se inicia con el reordenamiento microscópico y acercamiento de sus partículas sólidas, lo que se traduce en incremento significativo de la densidad aparente (Hamza y Anderson, 2005; Nawaz, Bourrié y Trolard, 2013; Panayiotopoulos, Papadopolou y Hatjiioannidou, 1994). Este fenómeno, considerado una de las principales amenazas para la salud del suelo a nivel global (Batey, 2009; FAO y ITPS, 2015), puede explicarse desde perspectiva mecánica mediante la concepción elastoplástica: el suelo exhibe respuesta elástica hasta determinado umbral de estrés, más allá del cual, cualquier aplicación de carga adicional induce deformación plástica irreversible (Horn, Domżzał, Słowińska y Van Ouwerkerk, 1995).

La susceptibilidad del suelo a la compactación y el valor de este umbral de estrés son altamente variables, dependiendo crucialmente de factores como la textura del suelo (con suelos limosos o con bajo contenido de arcilla siendo más susceptibles en condiciones de baja humedad, mientras que los arenosos muestran menor susceptibilidad), el grado de agregación y potencial mátrico (Horn *et al.*, 1995; Smith, Johnston y Lorentz, 1997). En consecuencia, la compactación impacta negativamente en la totalidad de los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo (Nawaz *et al.*, 2013), con efectos diferenciados según las características edáficas específicas. Cabe destacar que la presencia de materia orgánica puede mitigar la compactación, al incrementar la resistencia a la deformación y mejorar elasticidad y efectos de rebote del suelo (Smith *et al.*, 1997; Soane, 1990).

La Figura 1 ilustra de manera conceptual las interacciones y consecuencias de la compactación del suelo en los agroecosistemas. El diagrama parte de las causas de la compactación, diferenciadas entre procesos naturales (como la lluvia o el tráfico de fauna/peatonal, que ejercen carga ligera) y operaciones antrópicas (principalmente maquinaria agrícola y labranza, asociadas a cargas pesadas). La susceptibilidad del suelo a la compactación, representada por factores como humedad, textura y materia orgánica, modula la intensidad con la que estas cargas se traducen en el fenómeno central de la compactación del suelo. Posteriormente, se detallan los efectos multifacéticos de la compactación, agrupados en alteraciones de las propiedades físicas, químicas y biodiversidad del suelo, así como impacto directo en el crecimiento vegetal. Estas interacciones son bidireccionales y complejas, afectándose mutuamente. Finalmente, estas consecuencias, a nivel de suelo y planta, derivan en impacto ecosistémico global que abarca la atmósfera, hidrósfera y biosfera, que constituyen los límites externos del sistema.

Factores que Provocan la Compactación del Suelo

La compactación del suelo es un desafío constante en la agricultura y se origina principalmente debido a la presión ejercida por la maquinaria pesada. Factores como el peso del equipo, presión de los neumáticos y número de pasadas sobre el terreno; contribuyen significativamente a este problema. La compactación se manifiesta tanto en la superficie como en las capas profundas del suelo, alterando su estructura y reduciendo la porosidad (Orzech, Wanic y Załuski, 2021). Este fenómeno impacta negativamente la infiltración de agua y aire, dificulta el desarrollo de las raíces y disminuye la disponibilidad de nutrientes, comprometiendo la productividad agrícola.

Compactación producida por las ruedas de las máquinas. La compactación del suelo ocurre cuando la presión ejercida por la maquinaria agrícola supera la resistencia del suelo, deformándolo (Voltr, Wollnerová, Fuksa y Hruška, 2021). Esta deformación depende de las propiedades del suelo y de las características de la maquinaria, como el tamaño y la presión de los neumáticos (Hussain *et al.*, 2021). La presión de contacto entre el neumático y el suelo, peso del vehículo y resistencia del suelo determinan la profundidad de la compactación (Biberdzic *et al.*, 2020). La compactación superficial (hasta 30 cm) está influenciada principalmente por la presión de contacto, mientras que la compactación profunda (más de 30 cm) se debe al peso del vehículo. El número de pasadas, el patinaje de las ruedas y, posiblemente, la velocidad de desplazamiento también contribuyen a la compactación (Acquah y Chen, 2022).

Compactación producida por la labranza del suelo. La labranza tradicional somete al suelo a un ciclo de esponjamiento y compactación (Shaheb *et al.*, 2021; Voltr *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2023). Inicialmente, labores como la aradura aflojan el suelo, pero las operaciones posteriores para preparar la cama de siembra, así como el tránsito de maquinaria, inevitablemente lo compactan (Jabro, Allen, Rand, Dangi y Campbell, 2021). La intensidad de esta compactación depende del estado inicial del suelo, su humedad y tipo de implemento utilizado (Mileusnić *et al.*, 2022). La humedad óptima para la labranza coincide con el momento de mayor susceptibilidad a la compactación. Incluso las sembradoras pueden crear capas compactadas que dificultan la germinación (Lardy, DeSutter, Daigh, Meehan y Staricka, 2022; Lv *et al.*, 2023; Shaheb *et al.*, 2021).

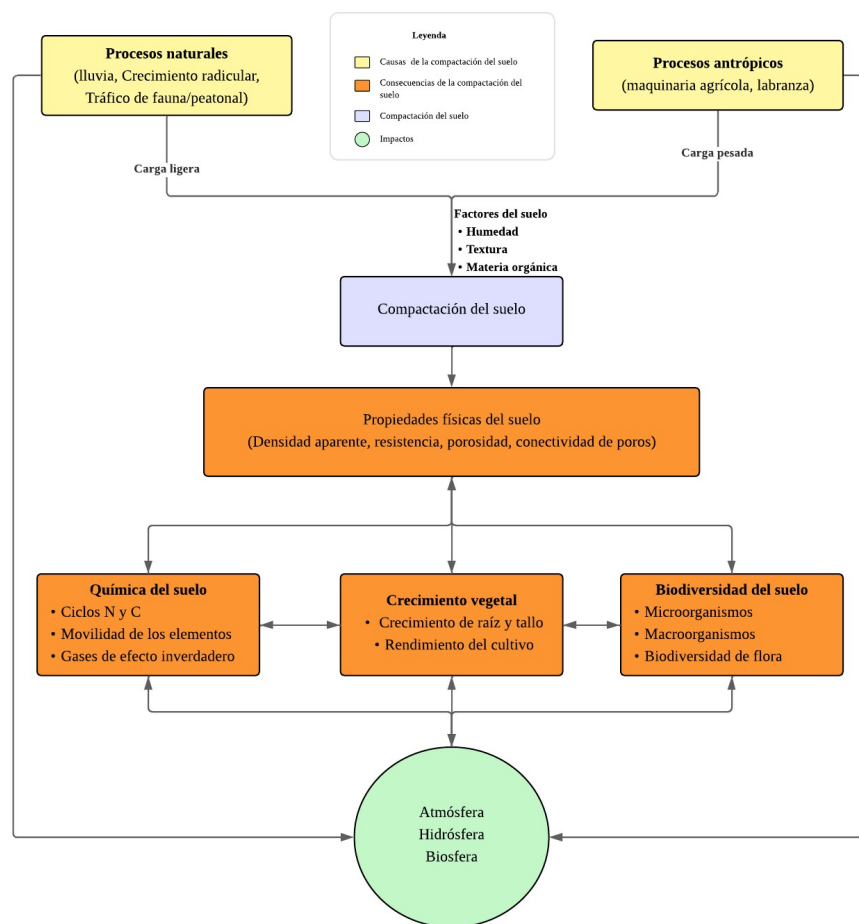


Figura 1. Causas y efectos de la compactación del suelo: Impacto sobre las propiedades edáficas, el crecimiento vegetal, la biodiversidad y los intercambios ecosistémicos.

Fuente: (Nawaz, Bourrié y Trolard, 2013).

Figure 1. Causes and effects of soil compaction: Impact on soil properties, plant growth, biodiversity and ecosystem exchanges. Source: (Nawaz, Bourrié and Trolard, 2013).

Efectos de la Compactación del Suelo en los Cultivos

La compactación del suelo afecta críticamente la emergencia de plántulas, desarrollo radicular y rendimiento de los cultivos, con variaciones significativas entre cereales y no cereales (Sun *et al.*, 2023). En cereales, compactación moderada puede favorecer la germinación de la semilla en suelos ligeros, pero el exceso reduce la emergencia y crecimiento radicular al limitar la difusión de oxígeno y aumentar la resistencia mecánica (Ferreira, Tormena, Severiano, Zotarelli y Betioli, 2021). La respuesta del maíz, por ejemplo, varía con la humedad: la compactación retrasa la emergencia en años húmedos, pero la mejora en años secos, al asegurar el contacto semilla-suelo (Sun *et al.*, 2023). El desarrollo radicular se ve limitado cuando la resistencia a la penetración supera 2 bar, aunque la presencia de grietas en el suelo puede mitigar este efecto (Mileusnić *et al.*, 2022). El rendimiento en cereales también depende de la humedad del suelo y la textura; suelos finos y alta pluviometría aumentan la sensibilidad a la compactación (Orzech *et al.*, 2021; Sun *et al.*, 2023; Zhang y Peng, 2021).

En cultivos no cereales, la compactación reduce la uniformidad de la germinación y el desarrollo radicular (Abed, Mahmood y Addaheri, 2024). Cultivos como papa, remolacha, algodón y soya son particularmente sensibles, mostrando reducciones significativas en la cubierta foliar, retraso en la emergencia y disminución del rendimiento con el aumento de la compactación. La resistencia a la penetración y aireación del suelo son cruciales para el desarrollo radicular en estos cultivos, con tubérculos y raíces que pueden deformarse bajo condiciones de alta compactación (Piccoli *et al.*, 2022).

En resumen, la relación entre la compactación del suelo y rendimiento del cultivo es crucial y depende de la interacción entre el tipo de suelo, humedad y aireación. La gestión adecuada de la compactación es esencial para mantener la productividad agrícola, considerando las diferencias en la respuesta de los distintos cultivos.

Pesos Transportados por las Máquinas Agrícolas y Presiones Generadas en la Interfase Neumático/Suelo

Tractores agrícolas. El Cuadro 2 muestra que los tractores con Tracción Frontal Asistida (TFA) predominan en Sudamérica alcanzando 57.5%, siendo generalmente más potentes y pesados que los de Tracción Simple (TS) que representan 42.5%. Alto porcentaje de estos tractores, especialmente los TFA, ejercen presión considerable sobre el suelo debido a la concentración de peso en el eje trasero, lo que puede resultar en compactación del suelo. Además, la relación peso/potencia, que es ligeramente superior en los modelos TFA, podría influir en la eficiencia del tractor y exacerbar el problema de la compactación.

El Cuadro 3 muestra que tanto los tractores de tracción simple (TS) como los de tracción frontal asistida (TFA) a menudo superan los límites de presión recomendados para evitar la compactación del suelo (generalmente entre 0.8 bares y 2.5 bares, o 12 PSI y 36 PSI) (Šimečková, Polcar, Hammerová, Votava y Kumbár, 2021). Es crucial consultar el manual del fabricante para obtener valores precisos para cada equipo. Se observa que la presión aumenta con el peso del tractor y disminuye a medida que el neumático se hunde más, incrementando el área de contacto. Los tractores TS, en rangos de peso similares, tienden a ejercer presiones ligeramente mayores que los TFA, subrayando la importancia de evaluar el tipo de tractor y la distribución del peso para minimizar la compactación (Moinfar *et al.*, 2021).

Máquinas agrícolas pesadas. El Cuadro 4 detalla los rangos de tara (peso en vacío), carga y peso total de 49 modelos de maquinaria agrícola pesada en el mercado sudamericano. Se resalta que, las cosechadoras de grano, los carros de transporte y algunas sembradoras de siembra directa son los equipos con mayor capacidad de carga. Este alto peso es factor que puede contribuir significativamente a la compactación profunda del suelo.

El Cuadro 5 presenta el número y porcentaje de modelos de maquinaria agrícola pesada comercializada en Sudamérica que exceden los límites de 2500 kg y 3500 kg. Para esta evaluación, los datos corresponden a los equipos operando bajo su mayor capacidad de carga, siendo estos valores los registrados sobre el eje más pesado, que es donde se concentra la máxima presión sobre el suelo. Dichos umbrales son críticos, pues se correlacionan con la compactación profunda en suelos susceptibles y resistentes, respectivamente. Los resultados son contundentes: todas las cosechadoras de grano superan ambos límites, lo que indica riesgo elevado de compactación severa. Asimismo, los carros de transporte y sembradoras de siembra directa también presentan proporción significativa de modelos que sobrepasan estas cargas críticas.

Tal como se observa en el Cuadro 6, las presiones en la interfaz neumático/suelo exceden consistentemente los límites recomendados para prevenir la compactación superficial (generalmente entre 0.8 bares y 2.5 bares) (Šimečková *et al.*, 2021). Esta superación es evidente en todo el rango, desde 1.9 bar en sembradoras convencionales hasta máximo de 8.9 bar en carros de transporte. Los valores promedio, con 3.5 bar para sembradoras y 6.4 bar para carros de transporte, ilustran claramente la alta capacidad de estos equipos para inducir compactación superficial severa en los suelos agrícolas.

Cuadro 2. Características generales y pesos de 127 modelos de tractores agrícolas comercializados en Sudamérica.
Table 2. General characteristics and weights of 127 models of agricultural tractors marketed in South America.

Características	Magnitud
Nº de marcas y modelos	14 y 127
Nº de modelos TS y TFA	54 y 73
Rango de potencia en 2WD, HP	50 - 107
Rango de potencia en TFA, HP	50 - 137
Rango de peso en TS, kg	1.390 - 6.120
Rango de peso en TFA, kg	1.670 - 9.330
Modelos con >2500 kg en eje trasero, 2WD y TFA, %	78 - 74
Modelos con >3500 kg en eje trasero, 2WD y TFA, %	31 - 41
Rango de peso por unidad de potencia en TS, kg HP ⁻¹	23.5 - 59.4
Rango de peso por unidad de potencia en TFA, kg HP ⁻¹	27.8 - 68.1

Fuente: Hetz (2001). TS = Tracción simple, TFA = Tracción Frontal Asistida.
Source: Hetz (2001). ST = Single Traction, AT = Assisted Front Traction.

Cuadro 3. Presiones generadas en la interfase neumático-suelo por 127 modelos de tractores agrícolas comercializados en Sudamérica (bar).
Table 3. Pressures generated at the pneumatic-soil interface by 127 models of agricultural tractors marketed in South America (bar).

Peso 103 kg	N° de modelos	Hundimiento 2 cm	Hundimiento 5 cm	Hundimiento 9 cm
TRACCIÓN SIMPLE (TS)				
< 2.5	11	2.09	1.34	1.02
2.6 - 3.0	16	2.30	1.47	1.12
3.1 - 3.5	8	2.35	1.50	1.14
3.6 - 4.0	8	2.50	1.60	1.21
4.1 - 4.5	5	2.67	1.70	1.29
4.6 - 5.0	4	3.07	1.96	1.49
5.1 - 5.5	0	--	--	--
>5.5	2	3.65	2.33	1.76
TOTAL	54	*2.44	*1.56	*1.18
TRACCIÓN FRONTAL ASISTIDA (TFA)				
<2,5	8	1.67	1.07	0.81
2.6 - 3.0	10	1.96	1.26	0.95
3.1 - 3.5	11	2.11	1.35	1.07
3.6 - 4.0	8	2.22	1.42	1.12
4.1 - 4.5	10	2.47	1.58	1.19
4.6 - 5.0	5	2.55	1.63	1.23
5.1 - 5.5	11	2.83	1.80	1.36
5.6 - 6.0	1	2.96	1.89	1.43
6.1 - 6.5	4	3.21	2.05	1.55
6.6 - 7.0	3	3.28	2.10	1.58
>7.0	2	4.46	2.84	2.15
TOTAL	73	*2.43	*1.55	*1.17

* Media aritmética. Fuente: Hetz (2001).

* Arithmetic mean. Source: Hetz (2001).

Estos datos, calculados con la maquinaria a carga máxima, indican que incluso con variaciones en la carga operativa, las presiones superan en 2 a 3 veces los límites seguros. Esto sugiere que la maquinaria agrícola pesada no está equipada con neumáticos adecuados para las cargas que transporta, representando riesgo significativo de compactación del suelo.

Prevención/Reducción de la Compactación del Suelo

La compactación del suelo es consecuencia inherente e inevitable en sistemas agrícolas con alto grado de mecanización. Sin embargo, sus efectos perjudiciales pueden mitigarse significativamente mediante la implementación de estrategias integrales. Estas incluyen selección y gestión adecuadas de la maquinaria agrícola, adopción de prácticas de labranza conservacionistas, aprovechamiento del efecto positivo de los factores naturales, e incorporación de tecnologías avanzadas como la agricultura de precisión. La optimización del peso operativo de la maquinaria, incluyendo el manejo del lastrado, es también pilar fundamental en este esfuerzo.

Gestión y selección de maquinaria agrícola para minimizar la compactación. La creciente tendencia global hacia maquinaria agrícola de mayor tamaño y peso ha exacerbado considerablemente el problema de la compactación del suelo. A pesar de los avances en el diseño de neumáticos y sistemas de tracción, las presiones en la interfaz neumático/suelo a menudo superan los niveles seguros (generalmente entre 0.8 bares y 2.5 bares, o 12 PSI y 36 PSI) (Šimečková et al., 2021), lo que resulta en daños estructurales irreversibles. Para contrarrestar esta problemática, se proponen diversas medidas:

Cuadro 4. Rangos de tara, carga y peso total de 49 modelos diferentes de máquinas agrícolas pesadas comercializadas en Sudamérica.
Table 4. Tare, load and total weight ranges of 49 different models of heavy agricultural machinery marketed in South America.

Máquinas	Tara	Carga	Peso total
	----- kg -----		
Carros de transporte	380 - 1500	2000 - 8000	2380 - 9500
Sembradoras cero labranza	1030 - 3330	460 - 1611	1490 - 4941
Sembradoras convencionales	440 - 2988	384 - 1026	824 - 4014
Pulverizadoras para huertos frutales	290 - 860	1000 - 2000	1290 - 2860
Cosechadoras de granos	6165 - 9460	1725 - 4620	7890 - 14080

Fuente: Hetz (2001).

Source: Hetz (2001).

Optimización del peso del tractor y lastrado. El peso total del tractor y su distribución son factores críticos en la compactación. Control riguroso del lastrado es esencial para equilibrar la tracción con la minimización de la presión sobre el suelo. El lastre debe ajustarse para cada labor específica, evitando el exceso que aumenta innecesariamente el peso y, por ende, la compactación. Esto implica i) retirar contrapesos o agua de los neumáticos cuando no son requeridos por la tracción, reduciendo el peso en vacío (eliminar lastres innecesarios) ii) mantener la presión mínima recomendada por el fabricante para la carga y velocidad dadas maximiza el área de contacto, distribuyendo mejor el peso (ajuste de la presión de inflado de los neumáticos); y, iii) asegurar que el lastrado se distribuya de forma óptima entre los ejes delantero y trasero para mejorar la tracción sin sobrecargar un área específica del suelo (distribución adecuada del peso).

Tipos de sistemas de tracción y neumáticos. La elección del sistema de tracción y características de los neumáticos son decisivas para distribuir la carga de manera efectiva y reducir la presión de contacto. Así, los tractores con cadenas (metálicas o de caucho) ofrecen superficie de contacto significativamente mayor, lo que reduce la presión específica sobre el suelo y, por ende, el riesgo de compactación, especialmente en suelos arcillosos o con baja capacidad portante. Sin embargo, su elevado costo inicial, mayor mantenimiento y las limitaciones para su uso en carretera restringen su adopción generalizada. Es importante considerar que la distribución de la presión bajo las cadenas no es completamente uniforme, pudiendo existir concentraciones de tensión bajo los rodillos (Sánchez-Girón, 1996).

La configuración de las ruedas gemelas en el eje trasero aumenta el área de apoyo del vehículo, lo que se traduce en reducción de la presión de contacto. No obstante, es fundamental evaluar su aplicación, pues en ciertas labores como el arado, el área total compactada podría incrementarse debido a la mayor superficie de contacto del tren rodante. Por ejemplo, con neumáticos 13.6-38 a 0.83 bar, la adición de ruedas gemelas puede aumentar el área de contacto en 55% (Sánchez-Girón, 1996), lo que requiere gestión cuidadosa.

Cuadro 5. Número y porcentaje de 5 tipos y 49 modelos diferentes de máquinas agrícolas pesadas comercializadas en Sudamérica con pesos >2 500 kg y >3 500 kg.

Table 5. Number and percentage of 5 types and 49 different models of heavy agricultural machinery marketed in South America with weights >2,500 kg and >3,500 kg.

Máquinas	Modelos con > 2 500 kg		Modelos con > 3 500 kg	
	Nº	%	Nº	%
Carros de transporte	17	100.0	9	52.9
Sembradoras cero labranza	9	50.0	4	22.2
Sembradoras convencionales	4	10.8	1	2.7
Pulverizadoras para huertos frutales	8	33.3	0	0.0
Cosechadoras de granos	1	100.0	11	100.0

Fuente: Hetz (2001).

Source: Hetz (2001).

Cuadro 6. Presiones generadas en la interfase neumático/suelo por 5 tipos y 49 modelos diferentes de máquinas agrícolas pesadas comercializadas en Sudamérica (bar).
Table 6. Pressures generated at the pneumatic/soil interface by 5 types and 49 different models of heavy agricultural machinery marketed in South America (bar).

Máquinas	Hundimiento 2 cm		Hundimiento 5 cm	
	Rango	Media	Rango	Media
Carros de transporte	4.2 - 8.9	6.4	2.5 - 5.7	4.2
Sembradoras cero labranza	3.6 - 8.7	6.1	2.3 - 5.6	3.9
Sembradoras convencionales	2.9 - 7.8*	5.4	1.9 - 5.1	3.5
Pulverizadoras para huertos frutales	2.5 - 6.9	4.7	**	**
Cosechadoras de granos	3.5 - 5.3	4.4	**	**

Fuente: Hetz (2001).
 Source: Hetz (2001).

Además, la mitigación de la compactación superficial es altamente dependiente de la optimización de tres variables clave en los neumáticos: el peso soportado, la presión de inflado y el tamaño del neumático. El ajuste individual o combinado de estas variables permite controlar eficientemente la presión de contacto con el suelo. El Cuadro 7 demuestra que la reducción efectiva de la presión de contacto se logra disminuyendo el peso (Caso 1), aumentando el ancho del neumático (Caso 2) o reduciendo la presión de inflado (Caso 3). En el Caso 3, combinaciones que implican disminución significativa de la presión de inflado pueden generar deterioro acelerado en los neumáticos, lo que requiere balance cuidadoso entre la protección del suelo e integridad de la maquinaria. Los Casos 5 (disminución de peso y presión de inflado) y 6 (aumento del ancho y disminución de la presión de inflado) también son estrategias eficaces para este fin. El Caso 7, que combina la reducción del peso, aumento del ancho del neumático y disminución de la presión de inflado, representa la estrategia más eficaz para minimizar la presión sobre el suelo.

Los Neumáticos de gran flotación (Terra-Tyres) representan una alternativa avanzada para minimizar la presión de contacto. Están diseñados para soportar cargas significativas (hasta 1.000 kg) operando con presiones de inflado extremadamente bajas, típicamente entre 0.07 bar y 0.1 bar (7 kPa y 10 kPa) (Diserens, 2009). Su gran huella de contacto reduce drásticamente la presión específica, disminuyendo la compactación.

Cuadro 7. Combinaciones para aumentar, disminuir o mantener constante la presión en el área de contacto neumático-suelo.
Table 7. Combinations for increasing, decreasing or maintaining constant pressure in the tyre-ground contact area.

Caso	VARIABLES INDEPENDIENTES			VARIABLE DEPENDIENTE
	Peso	Ancho del neumático	Presión de inflado	Presión de contacto
1	-	0	0	-
2	0	+	0	-
3	0	0	-	-
4	+/-	+/-	0	0
5	-	0	-	-
6	0	+	-	-
7	-	+	-	-

Fuente: Sánchez-Girón (1996). Nomenclatura = + aumento; - disminución; 0 constante.
 Source: Sánchez-Girón (1996). Nomenclature = + increase; - decrease; 0 constant.

Agricultura de precisión y rutas de tráfico controlado. La implementación de la agricultura de precisión ofrece herramientas valiosas para gestionar la compactación del suelo (Yazdinejad *et al.*, 2021). Una de las estrategias más efectivas es el Tráfico Controlado (CTF - *Controlled Traffic Farming*), que implica restringir el paso de maquinaria a rutas permanentes predefinidas (Bulgakov, Pascuzzi, Nadykto, Ivanovs y Adamchuk, 2021; McFadden, Njuki y Griffin, 2023), con los siguientes beneficios: i) concentración de la compactación (la compactación se intensifica solo en áreas de tráfico, preservando la estructura y salud del suelo en el resto del campo); ii) optimización del rendimiento (las zonas no compactadas mantienen mejor estructura, favoreciendo el desarrollo radicular, infiltración de agua y disponibilidad de nutrientes, lo que puede incrementar el rendimiento de cultivos como el maíz y la papa en 20% - 24 % (Sánchez-Girón, 1996), compensando posibles pérdidas en las áreas de tráfico; iii) eficiencia operativa (reduce la superposición de pasadas y optimiza el uso de insumos); y, iv) monitoreo y mapeo de la compactación, pues las tecnologías de agricultura de precisión (GPS, sensores de suelo, etc.) permiten identificar áreas con mayor riesgo de compactación para intervenciones específicas y monitorear la efectividad de las prácticas de manejo.

Prácticas de labranza del suelo. La labranza es herramienta eficaz, aunque con consideraciones específicas, para mitigar la compactación ya existente. Para la compactación superficial (hasta 30 cm), las labores de labranza primaria son generalmente correctivas. El arado de vertedera se muestra superior al arado de cincel para descompactar eficazmente esta capa, logrando reducción de la compactación en perfil de suelo más amplio, mientras que el arado de cincel solo es efectivo en los primeros 10 cm (Sánchez-Girón, 1996). La compactación profunda (más allá de 30 cm), de carácter acumulativo y originada principalmente por el peso de la maquinaria agrícola, representa un desafío mayor (Ning, Liu, Hu, Li y Kuzyakov, 2022). El subsolador es el implemento más utilizado para esta corrección. Su acción rompe las capas compactadas (pie de arado), mejora la infiltración del agua y esponja el suelo, facilitando el desarrollo radicular (Ramadhan y Alfari, 2023).

Los efectos del subsolado son temporales debido a la reconsolidación natural del suelo y a las futuras operaciones de labranza. Además, requiere alto consumo de energía y costos operativos significativos, por lo que se recomienda su aplicación únicamente en casos específicos y cuando la compactación profunda sea verificada. Sus efectos son más duraderos (3 años - 4 años) en suelos de textura media o fina con compactación genética, y menos duraderos (< 1 año) en suelos de textura gruesa donde la compactación es inducida por maquinaria (Xu *et al.*, 2024). Esta práctica se realiza comúnmente antes de la instalación de huertos frutales y plantaciones forestales. La eficiencia de la operación se optimiza ajustando la distancia entre pasadas, profundidad de trabajo y potencia requerida en función del marco de plantación (Navarro-Rosales, Fernández, Reyna, Gómez y Fernández, 2023). El Cuadro 8 presenta las Capacidades Efectivas de Trabajo (CET) para el subsolado a 1 m de profundidad, considerando diversas distancias entre hileras y velocidades de trabajo de 3.0 km h⁻¹ y 3.5 km h⁻¹, con eficiencia de campo de 70% y tractor de 100 HP

Cuadro 8. Capacidades Efectivas de Trabajo (ha h⁻¹) y costos relativos de la operación de subsolado a 1 m de profundidad para distancias entre pasadas de 1.0 m a 5.0 m (*).

Table 8. Effective working capacities (ha h⁻¹) and relative costs of subsoiling at a depth of 1 m for distances between passes of 1.0 m to 5.0 m (*).

Distancia entre pasadas, m	CET: 3 km h ⁻¹		CET: 3.5 km h ⁻¹		Costo relativo (%)**	
	ha h ⁻¹	h ha ⁻¹	ha h ⁻¹	h ha ⁻¹	3 km h ⁻¹	3.5 km h ⁻¹
1	0.21	4.76	0.24	4.16	299	261
1.5	0.32	3.13	0.37	2.7	197	170
2	0.42	2.38	0.49	2.04	150	128
2.5	0.52	1.92	0.61	1.64	121	103
3	0.63	1.59	0.73	1.37	100**	86
3.5	0.74	1.35	0.86	1.16	85	73
4	0.84	1.19	0.98	1.02	75	64
4.5	0.94	1.06	1.1	0.91	67	57
5	1.05	0.95	1.22	0.82	60	52

(*) Calculado con un tractor de 100 HP y una Eficiencia de Campo de 70%. ** Con base 100% asignada para 3.0 m entre pasadas y a 3 km h⁻¹ de velocidad

(*) Calculated with a 100 HP tractor and 70% field efficiency. ** Based on 100% allocation for 3.0 m between passes and at a speed of 3 km h⁻¹.

con toma de fuerza (TFA). Para distancias entre hileras de 2.5 m a 3.5 m, las CET varían de 0.52 ha h⁻¹ a 0.86 ha h⁻¹. Los costos relativos por hectárea oscilan entre 121 y 73% del costo base, establecido en 3 m entre pasadas y 3 km h⁻¹. El costo del subsolado varía significativamente según la profundidad y condiciones del terreno. Para el subsolado superficial (30 cm - 50 cm) en terrenos pedregosos, se estima precio aproximado de \$3.07 USD por metro cuadrado (Sukcharoenvipharat, Phoonkhwan y Usaborisut, 2023). En contraste, para el subsolado profundo (70 cm), se ha reportado un costo de alrededor de \$137.57 USD por hectárea (Lou et al., 2021).

Acción de los agentes naturales. Ciertos factores naturales pueden contribuir a la descompactación del suelo. En suelos ricos en arcillas expansivas (como las montmorillonitas), los cambios cíclicos en el contenido de humedad provocan fenómenos de expansión y contracción (Keller et al., 2021). Este movimiento natural ayuda a mejorar la porosidad e infiltración del agua, haciendo que estos suelos sean intrínsecamente menos susceptibles a la compactación persistente (Vitali, Büntgen y Bauhus, 2017). De manera similar, los ciclos de congelación y descongelación del agua en el suelo pueden generar fuerzas que rompen los agregados compactados. En contraste, en suelos arenosos, la baja presencia de arcillas o ausencia de ciclos de congelación-descongelación limita significativamente estos efectos descompactantes (Ferreira et al., 2021).

La acción de la macrofauna (lombrices de tierra, insectos) y la microfauna, junto con el crecimiento radicular de los cultivos, crea y mantiene macroporos que mejoran la estructura del suelo y la aireación, ayudando a revertir la compactación. La incorporación de materia orgánica fomenta esta actividad biológica (Tsyganko, Shtyrkhunova, Modina y Voskanyan, 2024).

Como se ilustra en la Figura 2, un enfoque integral es crucial para abordar la compactación del suelo. El diagrama detalla las interrelaciones entre las principales estrategias de prevención y mitigación, las cuales incluyen: optimización de la selección y manejo de la maquinaria agrícola (abarcando desde el lastrado hasta el uso de la agricultura de precisión para el tráfico controlado); aplicación de prácticas de labranza específicas para la descompactación; y provechamiento de los procesos naturales de restauración del suelo. Este conjunto de acciones, adaptado a las condiciones de cada sistema productivo, es indispensable para preservar la vitalidad del suelo y garantizar la sostenibilidad agrícola a largo plazo.

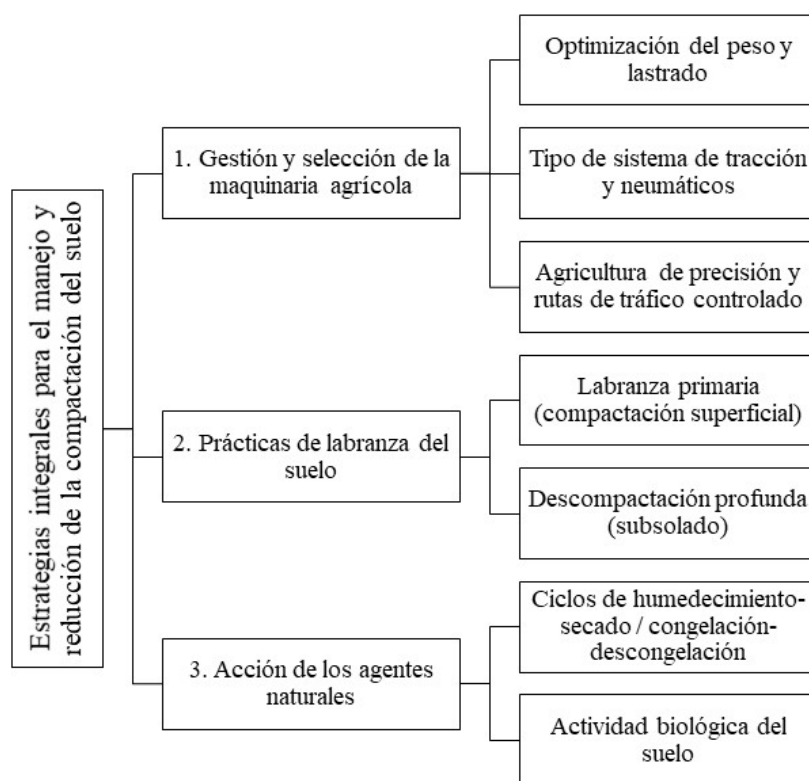


Figura 2. Estrategias para la prevención y reducción de la compactación del suelo.

Fuente: Elaboración propia.

Figure 2. Strategies for preventing and reducing soil compaction. Source: Prepared by the authors.

CONCLUSIÓN

La compactación del suelo es un fenómeno complejo e inevitable en la agricultura mecanizada, no obstante, su prevención y reducción eficaz demandan enfoque integral y proactivo. Es fundamental que las estrategias de mitigación aborden simultáneamente la optimización de la presión de contacto de la maquinaria, mejora de la capacidad de carga y estructura del propio suelo.

Esto se logra mediante la gestión inteligente de la maquinaria agrícola, que incluye la selección de tractores con bajo impacto, ajuste del lastrado, elección y manejo adecuados de neumáticos (incluyendo cadenas y ruedas gemelas) e implementación de sistemas de tráfico controlado a través de la agricultura de precisión. Asimismo, son cruciales las prácticas de labranza adaptadas para descompactar las capas superficiales y profundas cuando sea necesario (subsolado), así como la promoción de los procesos naturales de descompactación a través de la actividad biológica y los ciclos de humedad y temperatura.

La integración coherente de estas diversas tácticas, con adaptación precisa a las condiciones edáficas y operacionales de cada sistema de producción, permite mitigar de manera efectiva los efectos adversos de la compactación. Este enfoque no solo preserva la vitalidad del suelo, sino que también garantiza la viabilidad de la producción agrícola y contribuye a la construcción de un futuro alimentario más sostenible.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FINANCIACIÓN

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: E.H. y J.L.R.C.; metodología: J.L.R.B. y J.L.R.C.; validación, E.H.; análisis formal, J.L.R.C. y J.L.R.B.; investigación, E.H.H., J.L.R.C. y J.L.R.B.; curación de datos, J.L.R.B.; escritura: preparación del borrador original, J.L.R.C.; escritura: revisión y edición, J.L.R.B.; visualización, J.L.R.B.; supervisión, E.H.

AGRADECIMIENTOS

No aplicable.

LITERATURA CITADA

- Abed, B., Mahmood, E. K., & Addaheri, A. M. (2024). Impact of Humic Substances on Alleviation of Soil Salinity and the Enhancement of Plant Productivity: a review. *University of Thi-Qar Journal of Agricultural Research*, 13(1), 176-184. <https://doi.org/10.54174/szm42027>
- Acquah, K., & Chen, Y. (2022). Soil Compaction from Wheel Traffic under Three Tillage Systems. *Agriculture*, 12(2), 219. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020219>
- Batey, T. (2009). Soil compaction and soil management – a review. *Soil Use and Management*, 25(4), 335-345. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00236.x>
- Bhattacharyya, S. S., Leite, F. F. G. D., France, C. L., Adekoya, A. O., Ros, G. H., de Vries, W., ... & Parra-Saldivar, R. (2022). Soil carbon sequestration, greenhouse gas emissions, and water pollution under different tillage practices. *Science of the Total Environment*, 826, 154161. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154161>

- Biberdzic, M., Barac, S., Lalevic, D., Djikic, A., Prodanovic, D., & Rajicic, V. (2020). Influence of soil tillage system on soil compaction and winter wheat yield. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 80(1), 80-89. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392020000100080>
- Bulgakov, V., Pascuzzi, S., Nadykto, V., Ivanovs, S., & Adamchuk, V. (2021). Experimental study of the implement-and-tractor aggregate used for laying tracks of permanent traffic lanes inside controlled traffic farming systems. *Soil and Tillage Research*, 208, 104895. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104895>
- Carrillo-Martínez, C. J., Álvarez-Fuentes, G., & Aguilar-Benítez, G. (2022). Análisis de la calidad del suelo bajo producción intensiva de chile (*Capsicum annuum* L.) en la región irrigada por el acuífero, Calera, Zacatecas, México. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-11. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.942>
- Diserens, E. (2009). Calculating the contact area of trailer tyres in the field. *Soil and Tillage Research*, 103(2), 302-309. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.10.020>
- Dörner, J., Bravo, S., Stoorvogel, M., Dec, D., Valle, S., Clunes, J., ... & Zuniga, F. (2022). Short-term effects of compaction on soil mechanical properties and pore functions of an Andisol. *Soil and Tillage Research*, 221, 105396. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105396>
- FAO y ITPS (Organization of the United Nations & Intergovernmental Technical Panel on Soils). (2015). *Status of the world's soil resources: Main report*. Roma, Italia: FAO. ISBN: 978-92-5-108960-6
- Ferreira, C. J. B., Tormena, C. A., Severiano, E. D. C., Zotarelli, L., & Betioli-Júnior, E. (2021). Soil compaction influences soil physical quality and soybean yield under long-term no-tillage. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 67(3), 383-396. <https://doi.org/10.1080/03650340.2020.1733535>
- Frene, J. P., Pandey, B. K., & Castrillo, G. (2024). Under pressure: elucidating soil compaction and its effect on soil functions. *Plant and Soil*, 502(1), 267-278. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06573-2>
- Hamza, M. A., & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121-145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Hetz, E. (2001). Soil compaction potential of tractors and other heavy agricultural machines. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, 32, 38-42.
- Horn, R., Domżał, H., Słowińska-Jurkiewicz, A., & Van Ouwerkerk, C. (1995). Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil and Tillage Research*, 35(1-2), 23-36. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(95\)00479-c](https://doi.org/10.1016/0167-1987(95)00479-c)
- Hussain, S., Hussain, S., Guo, R., Sarwar, M., Ren, X., Krstic, D., ... & El-ESAWI, M. A. (2021). Carbon sequestration to avoid soil degradation: A review on the role of conservation tillage. *Plants*, 10(10), 2001. <https://doi.org/10.3390/plants10102001>
- Jabro, J. D., Allen, B. L., Rand, T., Dangi, S. R., & Campbell, J. W. (2021). Effect of previous crop roots on soil compaction in 2 yr rotations under a no-tillage system. *Land*, 10(2), 202. <https://doi.org/10.3390/land10020202>
- Keller, T., Colombi, T., Ruiz, S., Schymanski, S. J., Weisskopf, P., Koestel, J., ... & Or, D. (2021). Soil structure recovery following compaction: Short-term evolution of soil physical properties in a loamy soil. *Soil Science Society of America Journal*, 85(4), 1002-1020. <https://doi.org/10.1002/saj2.20240>
- Lardy, J. M., DeSutter, T. M., Daigh, A. L. M., Meehan, M. A., & Staricka, J. A. (2022). Effects of soil bulk density and water content on penetration resistance. *Agricultural & Environmental Letters*, 7(2), e20096. <https://doi.org/10.1002/ael2.20096>
- Liu, D., Tian, B., Zhang, M., Jiang, L., Li, C., Qin, X., & Ma, J. (2025). Meta-analysis of the effects of different tillage methods on wheat yields under various conditions in China. *Soil and Tillage Research*, 248, 106449. <https://doi.org/10.1016/j.still.2025.106449>
- Lou, S., He, J., Li, H., Wang, Q., Lu, C., Liu, W., ... & Li, H. (2021). Current knowledge and future directions for improving subsoiling quality and reducing energy consumption in conservation fields. *Agriculture*, 11(7), 575. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070575>
- Lv, L., Gao, Z., Liao, K., Zhu, Q., & Zhu, J. (2023). Impact of conservation tillage on the distribution of soil nutrients with depth. *Soil and Tillage Research*, 225, 105527. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105527>
- McFadden, J. R., Njuki, E., & Griffin, T. W. (2023). *Precision agriculture in the digital era: Recent adoption on U.S. farms*. Washington, D.C., USA: U.S. Department of Agriculture. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.333550>
- Mileusnić, Z. I., Saljnikov, E., Radojević, R. L., & Petrović, D. V. (2022). Soil compaction due to agricultural machinery impact. *Journal of Terramechanics*, 100, 51-60. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2021.12.002>
- Moinfar, A., Shahgholi, G., Abbaspour-Gilandeh, Y., Herrera-Miranda, I., Hernández-Hernández, J. L., & Herrera-Miranda, M. A. (2021). Investigating the effect of the tractor drive system type on soil behavior under tractor tires. *Agronomy*, 11(4), 696. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040696>
- Navarro-Rosales, F., Fernández-Habas, J., Reyna-Bowen, L., Gómez, J. A., & Fernández-Rebollo, P. (2023). Subsoiling for planting trees in dehesa system: long-term effects on soil organic carbon. *Agroforestry Systems*, 97(4), 699-710. <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00820-8>
- Nawaz, M. F., Bourrié, G., & Trolard, F. (2013). Soil compaction impact and modelling. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(2), 291-309. <https://doi.org/10.1007/s13593-011-0071-8>
- Ning, T., Liu, Z., Hu, H., Li, G., & Kuzyakov, Y. (2022). Physical, chemical and biological subsoiling for sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research*, 223, 105490. <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105490>
- Orzech, K., Wanic, M., & Załuski, D. (2021). The effects of soil compaction and different tillage systems on the bulk density and moisture content of soil and the yields of winter oilseed rape and cereals. *Agriculture*, 11(7), 666. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070666>
- Panayiotopoulos, K. P., Papadopoulou, C. P., & Hatjioannidou, A. (1994). Compaction and penetration resistance of an Alfisol and Entisol and their influence on root growth of maize seedlings. *Soil and Tillage Research*, 31(4), 323-337. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(94\)90039-6](https://doi.org/10.1016/0167-1987(94)90039-6)
- Peralta, G., Alvarez, C. R., & Taboada, M. A. (2021). Soil compaction alleviation by deep non-inversion tillage and crop yield responses in no tilled soils of the Pampas region of Argentina. A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 211, 105022. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105022>
- Piccoli, I., Seehusen, T., Bussell, J., Vizitu, O., Calciu, I., Berti, A., ... & Bolinder, M. A. (2022). Opportunities for mitigating soil compaction in Europe- Case studies from the soilcare project using soil-improving cropping systems. *Land*, 11(2), 223. <https://doi.org/10.3390/land11020223>
- Poppiel, R. R., Cherubin, M. R., Novais, J. J., & Demattê, J. A. (2025). Soil health in Latin America and the Caribbean. *Communications Earth & Environment*, 6(1), 141. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-02021-w>
- Pulido-Moncada, M., Petersen, S. O., & Munkholm, L. J. (2022). Soil compaction raises nitrous oxide emissions in managed agroecosystems. A review: Soil compaction raises nitrous oxide emissions in managed agroecosystems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 42(3), 38. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00773-9>
- Ramadhan, M. N., & Alfaris, M. A. A. (2023). Soil Properties and Maize Growth as Affected by Subsoiling and Traffic-Induced Compaction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1225(1), 012077. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1225/1/012077>
- Ren, L., D'Hose, T., Borra-Serrano, I., Lootens, P., Hanssens, D., De Smedt, P., ... & Ruyschaert, G. (2022). Detecting spatial variability of soil compaction using soil apparent electrical conductivity and maize traits. *Soil Use and Management*, 38(4), 1749-1760. <https://doi.org/10.1111/sum.12812>

- Sánchez-Girón, V. (1996). *Dinámica y mecánica de suelos*. Madrid, España: Ediciones Agrotécnicas, S.L. ISBN 978-84-87480-74-4.
- Shaheb, M. R., Venkatesh, R., & Shearer, S. A. (2021). A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. *Journal of Biosystems Engineering*, 46(4), 417-439. <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>
- Šimečková, J., Polcar, A., Hammerová, A., Votava, J., & Kumbár, V. (2021). Changes to the physical properties of the soil after the passage of an agricultural tractor. *International Agrophysics*, 35(1), 97-105. <https://doi.org/10.31545/intagr/133752>
- Smith, C. W., Johnston, M. A., & Lorentz, S. (1997). Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. II. Soil properties affecting compactibility and compressibility. *Soil and Tillage Research*, 43(3-4), 335-354. [https://doi.org/10.1016/s0167-1987\(97\)00023-8](https://doi.org/10.1016/s0167-1987(97)00023-8)
- Soane, B. D. (1990). The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. *Soil and Tillage Research*, 16(1-2), 179-201. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(90\)90029-d](https://doi.org/10.1016/0167-1987(90)90029-d)
- Sukcharoenvipharat, W., Phoonkhwan, R., & Usaborisut, P. (2023). A low-cost soil strength and subsoiling depth measuring system and soil mapping derived from field tests. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 22(3), 139-148. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2022.07.004>
- Sun, Q., Sun, W., Zhao, Z., Jiang, W., Zhang, P., Sun, X., & Xue, Q. (2023). Soil compaction and maize root distribution under subsoiling tillage in a wheat-maize double cropping system. *Agronomy*, 13(2), 394. <https://doi.org/10.3390/agronomy13020394>
- Tsyganko, E., Shtyrkhunova, N., Modina, M., & Voskanyan, A. (2024). Soil degradation in the process of agricultural activities. *BIO Web of Conferences*, 103, 00061. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202410300061>
- Vitali, V., Büntgen, U., & Bauhus, J. (2017). Silver fir and Douglas fir are more tolerant to extreme droughts than Norway spruce in south-western Germany. *Global Change Biology*, 23(12), 5108-5119. <https://doi.org/10.1111/gcb.13774>
- Voltr, V., Wollnerová, J., Fuksa, P., & Hruška, M. (2021). Influence of tillage on the production inputs, outputs, soil compaction and GHG emissions. *Agriculture*, 11(5), 456. <https://doi.org/10.3390/agriculture11050456>
- Xu, X., Jing, P., Yao, Q., Chen, W., Meng, H., Li, X., ... & Peng, H. (2024). Parameter optimization and test for the pulse-type gas explosion subsoiler. *Agriculture*, 14(8), 1417. <https://doi.org/10.3390/agriculture14081417>
- Yazdinejad, A., Zolfaghari, B., Azmoodeh, A., Dehghantanha, A., Karimipour, H., Fraser, E., ... & Duncan, E. (2021). A review on security of smart farming and precision agriculture: Security aspects, attacks, threats and countermeasures. *Applied Sciences*, 11(16), 7518. <https://doi.org/10.3390/app11167518>
- Zhang, X., Wang, J., Feng, X., Yang, H., Li, Y., Yakov, K., ... & Li, F. M. (2023). Effects of tillage on soil organic carbon and crop yield under straw return. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 354, 108543. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108543>
- Zhang, Z., & Peng, X. (2021). Bio-tillage: A new perspective for sustainable agriculture. *Soil and Tillage Research*, 206, 104844. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104844>