

Degradación del suelo por compactación en función de la distribución del peso en los ejes de los tractores agrícolas

Soil degradation by compaction as a function of weight distribution on the axles of agricultural tractors

Natalia Gómez Calderón*, Javier Rodríguez-Yáñez **

*Instituto Tecnológico de Costa Rica. Contacto: ngomezcalderon@gmail.com

**Universidad Estatal a Distancia. Contacto: urutico@gmail.com

Referencia/ reference:

Gómez, N., Rodríguez, J. (2019). Degradación del suelo por compactación en función de la distribución del peso en los ejes de los tractores agrícolas. *Yulök Revista de Innovación Académica*. 3(2), 44-50

Recibido: 1 de marzo del 2019

Aceptado: 22 de noviembre del 2019

Publicado: 11 de diciembre del 2019

Resumen

La compactación del suelo causada por el tráfico de maquinaria agrícola influye negativamente en una serie de funciones del suelo y servicios del ecosistema. Utilizando la información de los equipos agrícolas inscritos en Costa Rica y considerando que el límite promedio de peso que resiste el suelo en condiciones friables es de 49 kN por eje, se plantearon tres escenarios de distribución de pesos estáticos en el eje delantero y trasero. Se obtuvo que solo el 3,1 % de los tractores con neumáticos excedió el peso límite, pero cuando se analizó el tractor con el implemento suspendido, se encontró que la distribución de la carga genera un efecto en el porcentaje de exceso de peso en los ejes. Los tractores de mayor potencia deberían usar implementos de levante de menor peso que su capacidad, o bien utilizar aperos de tiro para que no excedan el peso límite en ninguno de sus ejes.

Palabras clave: Compactación, lastrado, mecánica de suelos, maquinaria agrícola

Abstract

Soil compaction caused by agricultural machinery traffic has a negative effect on a range of soil functions and ecosystem services. Using the information of the agricultural equipment registered in Costa Rica and considering that the average weight limit that resists the soil in friable conditions is 49kN per axis, three scenarios of static weight distribution were proposed in the front and rear axles. It was found that only 3.1% of the tractors with tires exceeded the weight limit, but when the tractor was analyzed with the suspended implement, it was found that the distribution of the load generates an effect in the percentage of excess weight in the axles. The more powerful tractors should use lifting implements of less weight than their capacity, or use pulling implements so that they do not exceed the limit weight in any of their axes.

Keywords: Compaction, ballasting, soil mechanics, agricultural machinery

Introducción

La compactación causada por el tráfico de maquinaria agrícola influye negativamente en una serie de funciones del suelo y servicios del ecosistema, tales como la productividad del suelo, el almacenamiento de agua y el filtrado del suelo (Hartge y Horn, 2016; Lal y Shukla, 2005; Vaz, Manieri, de María y Tuller, 2011). Adicionalmente, puede generar mayores requerimientos de potencia

de la maquinaria utilizada y de insumos de producción (Gutiérrez-Rodríguez et al., 2012; Pérez Soto, 2012). La compactación se produce cuando la tensión mecánica del suelo supera la resistencia mecánica de este, por lo que el riesgo de compactación podría ser menor si se aumenta la resistencia, o bien se reduce la tensión sobre el suelo. En la práctica, es más fácil regular el estrés del suelo inducido por el vehículo que corre sobre este, que controlar la resistencia del suelo relacionada con la es-

estructura, las interacciones suelo-raíz y el potencial matricial. Lo anterior se logra disminuyendo la carga o aumentando el área de contacto de la maquinaria agrícola al utilizar trenes de rodamiento para distribuir uniformemente en la interfaz neumático-suelo o pista-suelo (Serrano, Peça, Silva, & Márquez, 2009).

Keller y Arvidsson (2016) demostraron que la tensión vertical en la interfaz de la pista de goma-suelo está distribuida de manera desigual. Esto puede poner en peligro el potencial de la pista para reducir los riesgos de compactación del suelo, y que la distribución de la tensión en la interfaz neumático-suelo tenga un impacto significativo en el patrón de tensión en el perfil. Se ha comprobado que la compactación superficial se produce por la presión en la zona de contacto rueda-suelo (Arvidsson y Keller, 2011; Gasso, Sørensen, Oudshoorn y Green, 2013), y que si el peso de un eje no sobrepasa los 49 kN, solo compactará los primeros 30 cm del perfil del suelo independientemente de sus características, cuando se hicieron pruebas en suelos friables, es decir un contenido de humedad entre el límite de contracción y el límite inferior plástico.

Pese a lo anterior, considerar un peso máximo de 49 kN por eje en la maquinaria agrícola o usar equipos ligeros no garantiza que el suelo no se compacte si se realizan exceso de pasadas o un tráfico no controlado de la maquinaria (Gómez-Calderón, Villagra-Mendoza y Solórzano-Quintana, 2018). Según Jorajuria y Draghi (2000), diez pases de equipos ligeros producen el mismo efecto que cuatro pases de equipos pesados, además, se considera que un solo impacto de la llanta sobre el suelo ocasiona entre 70 % y 90 % de la compactación que resulta después de impactos múltiples.

Gutiérrez-Rodríguez et al. (2012); Ribes, Marcos, Agüera y Blanco (2005) y Terminiello et al. (2000) demostraron que la presión ejercida por los neumáticos en un solo eje es proporcional al peso total de la maquinaria. Por lo tanto, un incremento en la carga del equipo incrementa la presión del neumático y el área de contacto. Para una superficie rígida, un incremento en la presión del neumático resulta en un incremento en el área de contacto. Para un medio poroso, sin embargo, el incremento en la presión es acompañada, también por la deformación del suelo que causa la compactación y la formación de huellas permanentes de las rueda (Horne y Hartge, 2016; Lal y Shukla, 2005; Salem, Valero, Muñoz, Rodríguez y Silva, 2015; Serrano et al., 2009).

Asimismo, al aumentar la carga, el balance de esta en los ejes de la maquinaria resulta clave para reducir el peso en cada uno. El balance se realiza estáticamente mediante sumatorias de componentes verticales de los pesos y sumatorias de los pares generados en cada eje para encontrar las fuerzas de reacción en cada punto de apoyo (Arrazate-Oropeza, Gómez-Calderón y Villagra-Mendoza, 2016). Desde un punto de vista de vida útil del sistema de transmisión de potencia de las máquinas agrícolas, el peso de un tractor agrícola unido a lo que cargue, debería estar distribuido 40 % en el eje delantero y un 60 % en el eje trasero, normalmente indicado por los fabricantes (Gómez-Calderón et al., 2018). El peso total de los tractores agrícolas incluyen los contrapesos delanteros y adicionales en los rodajes, por lo que las distribuciones y balances se realizan intercambiándolos de ubicación (Deere, 2012).

En cuanto a la legislación en Costa Rica, el Reglamento de la Ley N.º 7779 de Uso, Manejo y Conservación de Suelos, en el capítulo IV, artículo 53, inciso F sobre la maquinaria que contribuye a la degradación de suelos, se indica que los tractores de potencia mayor de 100 HP (74,57 kW) compactan el suelo (Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG], 1998).

El presente trabajo tiene la finalidad de caracterizar el parque de tractores de Costa Rica que tienen rodajes neumáticos, por lo que se pretende (1) verificar en qué escenarios de balanceo de pesos entre ejes, la máquina opera en condiciones adecuadas para su ciclo de vida y el buen tratamiento del suelo como recurso y (2) recomendar condiciones adecuadas de operación en función de los pesos por eje de cada tractor con implementos suspendidos en los tres puntos de levante hidráulico.

Metodología

El parque vehicular de Costa Rica está detallado en la base de datos del pago del impuesto de circulación (marchamo), el cual es obligatorio para cualquier máquina nueva o usada que ingrese al país, por lo que constituye la lista oficial y confiable de la totalidad de vehículos en Costa Rica; esta fue proporcionada por el Instituto Nacional de Seguros (INS) para vehículos inscritos hasta el año 2016. Dispone de información sobre el año, modelo, estilo, marca, cilindrada, peso, tracción y categoría asignada en la inscripción para cada uno de los vehículos.

Para obtener el parque de tractores agrícolas con neumáticos se consideraron solamente los vehículos de la cate-

goría “Equipo Especial Agrícola”. Para esta categoría se eliminaron las máquinas con las siguientes condiciones:

- Vehículos con cilindradas de motor menores a 800 cm³
- Aquellas clasificadas como cargadoras de Caña de llanta y oruga, cosechadoras de algodón, arroz, maíz y caña, pulverizadoras, fumigador de llanta, tractor agrícola de oruga.
- Las que tuvieran más de 20 años de antigüedad al año 2016.
- Pesos mayores a 10 kN.
- Tractores agrícolas con trenes de rodaje, debido a que representaron datos atípicos dentro del análisis previo. Además, el balanceo de pesos es diferente a los tractores con neumáticos.

Luego de la selección, se obtuvo que el 75 % del parque de maquinaria agrícola del país está constituido por los tractores de llantas (neumáticos). A cada tractor se le asignó la capacidad máxima de levante en los brazos hidráulicos según marca y modelo, con lo cual se evidenció el peso de cada unidad y el peso total del conjunto del tractor con el implemento suspendido máximo que puede concentrarse en el centroide del conjunto. Además, se excluyeron los conjuntos cuyo peso total fue inferior a 49 kN, por lo que resulta en 72,18 % de la totalidad de equipos agrícolas de ruedas que ingresaron entre 1996 y 2016 al país.

Por consiguiente, se agruparon por rangos de peso del tractor y de peso total del conjunto cada 10 kN. Para cada grupo se promedió el peso del tractor y el peso del conjunto con su respectiva desviación estándar. No se relacionó el peso de los equipos con la potencia del tractor,

debido a que existen equipos con la misma potencia, pero con diferencias de peso significativas. La desviación promedio de potencia fue de 12 kW por grupo, sin embargo, se consideró en el análisis como parámetro.

Luego, se construyeron escenarios con las distribuciones de peso puntual en cada eje de los tractores con y sin la carga de levante, lo cual se presenta en la tabla 1. La distribución de los pesos corresponde a un balanceo estático sin considerar aspectos de operación de la maquinaria.

Se analizaron los pesos concentrados en cada eje para cada escenario de distribución, y se compararon con un peso recomendado de 49 kN en cada uno. Lo anterior sin considerar las restricciones de fricción y pendientes del terreno en operaciones de campo.

Resultados y análisis

En la tabla 2 se muestra el resumen de los pesos de la flota agrícola del país (tractores de llantas) con el porcentaje acumulado, esta representa los equipos en estudio, agrupados en rangos de 10 kN. Si se utiliza el peso por eje de 49 kN como parámetro favorable para evitar la degradación de suelos por compactación, 72,35 % de los tractores de llantas son adecuados, si se considera únicamente su peso total, además de estar dentro del límite de potencia neta promedio que se indica en el reglamento de la Ley de Uso, Manejo y Conservación de Suelos de Costa Rica, el cual indica que no debe exceder de 100 HP (74,57 kW).

Los escenarios de balance estático de pesos de los tractores entre eje delantero y trasero, sin cargas adicionales se muestran en la figura 1. La distribución de pesos de los tractores por eje muestra que 99,2 % no tiene restricciones de pesos por eje cuando la distribución es del 50 % en cada uno (figura 1a). Asimismo, cuando el balance estático de pesos es de 40 % y 60 % en el eje delantero y trasero respectivamente, el 98,7 % del parque cumple

Tabla 1. Escenarios de distribuciones de peso de los tractores individuales y de los conjuntos tractor- implemento.

Escenario	Porcentaje de peso eje delantero	Porcentaje de peso eje trasero	Situación según recomendaciones de fabricantes y operación normal en el campo
(a)	50	50	Incorrecta y frecuente
(b)	40	60	Correcta
(c)	30	70	Incorrecta y frecuente

Fuente: elaboración propia.

Tabla 2. Peso y potencia neta promedio de tractores en rangos de 10kN

Rango kN	% Acumulado de tractores	Potencia neta de tractor kW		Tractor (kN)		Conjunto (kN)	
		Promedio	Error +/-	Peso promedio	Error +/-	Peso promedio	Error +/-
< 10	0,38	30,05	8,58	10,71	0,33	19,27	0,60
10-20	2,76	31,39	11,82	14,24	1,73	25,63	3,12
20-30	6,30	38,84	11,52	19,74	1,85	35,53	3,33
30-40	10,79	53,58	12,26	25,31	1,73	45,56	3,11
40-50	30,31	62,98	6,83	29,92	1,04	53,86	1,88
50-60	46,60	68,06	5,53	35,47	1,95	63,84	3,51
60-70	61,68	75,02	7,87	42,22	1,77	76,00	3,18
70-80	72,35	81,82	11,65	46,59	1,74	83,86	3,13
80-90	84,74	89,88	13,60	52,52	1,55	94,52	2,79
90-100	90,66	95,50	11,08	57,71	1,39	103,88	2,50
100-110	94,18	100,50	13,71	63,56	1,78	114,41	3,20
110-120	96,91	104,80	16,52	68,16	1,65	122,69	2,97
120-130	97,97	113,52	19,09	74,71	1,53	134,47	2,76
140-150	98,37	116,10	20,95	79,41	1,22	142,93	2,20
150-160	98,72	118,25	20,60	87,39	1,56	157,30	2,81
160-170	98,77	130,50	5,27	91,89	0,11	165,40	0,20
170-180	98,90	126,77	34,58	97,23	1,23	175,01	2,21
180-190	99,17	108,80	24,67	103,00	1,16	185,40	2,09
190-200	99,70	153,40	3,59	107,23	0,33	193,01	0,60
210-220	99,77	207,30	3,87	120,00	1,82	216,00	3,28
220-230	99,85	212,03	34,30	127,01	0,45	228,62	0,81
230-240	99,95	189,41	20,53	131,60	2,32	236,88	4,18
240-250	100,00	193,88	36,91	133,96	0,35	241,12	0,62

Fuente: elaboración propia.

con el límite por eje establecido en 49 kN (figura 1b). El 96,9 % de los tractores de llantas del país no excede de 49 kN por eje cuando los pesos se distribuyen estáticamente 30 % en el eje delantero y 70 % en el eje trasero (figura 1c). En todos los casos, la potencia de los tractores que excedieron el peso promedio límite por eje fue mayor de 104,8 kW, lo que excede la potencia recomendada en el reglamento de la Ley 7779 de Uso, Manejo y Conservación de Suelos.

En la figura 2 se muestran los tres escenarios de balanceo estático de pesos en el eje delantero y trasero del tractor en conjunto con un implemento suspendido en los tres puntos, en donde se supone la capacidad máxima de levante hidráulico del tractor. Cuando el peso se distribuye

50 % en eje delantero y 50 % en el eje trasero, el 85 % del parque de tractores no sobrepasaría en ninguno de sus ejes el límite de peso recomendado para no degradar el suelo (figura 2a), los cuales corresponden en promedio a potencias inferiores a 90kW del motor del tractor agrícola, esto excede la potencia recomendada en la legislación. A la hora de que se distribuyen los pesos estáticamente en una relación 40 %-60 % del peso en el eje delantero y trasero respectivamente, el 62 % del parque de tractores del país no presenta restricciones desde una perspectiva de degradación del suelo, ni en utilizar la capacidad máxima de levante, siempre que el peso esté adecuadamente balanceado entre sus ejes (figura 2b). En el caso de que el balance estático entre los ejes es de 30 % del peso en el eje delantero y 70 % en el trasero, la proporción del par-

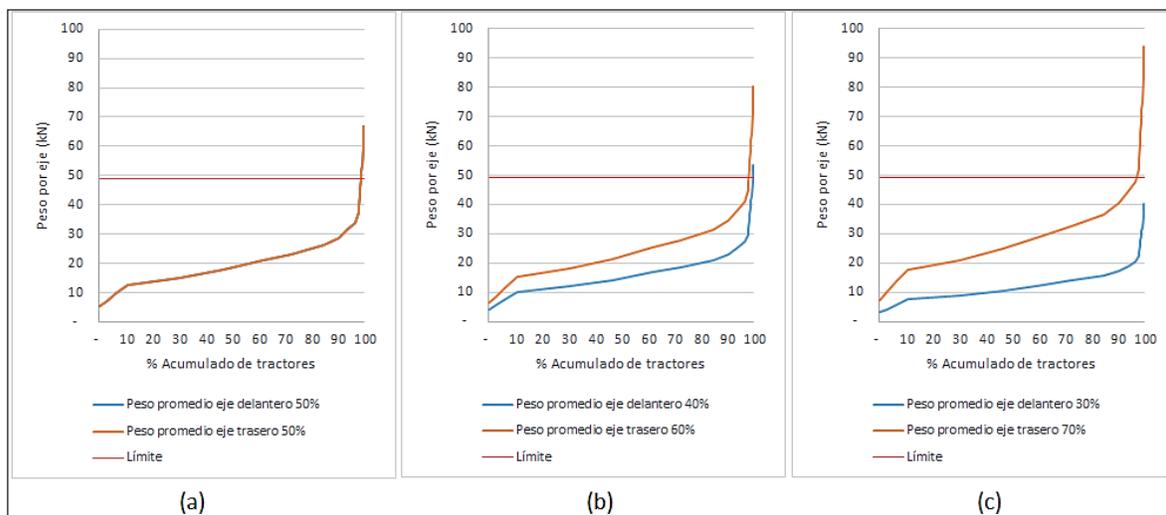


Figura 1. Escenarios de balance estático de pesos del tractor entre ejes delantero y trasero (a) 50 %-50 %, (b) 40 %-60 %, (c) 30 %-70 %. **Fuente:** elaboración propia.

que que no causaría efectos en la compactación del suelo es del 47 % (figura 2c) y la potencia máxima promedio adecuada sería de 68 kW. El escenario (c) es el más restrictivo de la flota de tractores agrícolas con neumáticos en cuanto a peso y potencia en relación con los otros escenarios de balance del peso de la maquinaria entre sus ejes.

Si el peso total del conjunto de tractor agrícola e implemento suspendido se distribuye adecuadamente entre el eje delantero y trasero: 40 % y 60 %, respectivamente, los tractores agrícolas que tengan una potencia mayor de 81,82 kW, según el promedio, deberían de usar implementos suspendidos de menor peso que su capacidad de levante o bien utilizar aperos de tiro. La cantidad de má-

quinas asociada a esta situación corresponde al 15 % del total de tractores agrícolas del país.

Conclusiones y recomendaciones

Para el uso integralmente correcto de los tractores agrícolas e implementos en el campo se deben considerar aspectos mecánicos de la maquinaria y límites de afectación al suelo como recurso, debido al peso en cada eje de apoyo. El 62 % del parque de tractores agrícolas de llantas inscritos en Costa Rica hasta el año 2016, con un balance del peso del 40 % en el eje delantero y el 60 % del peso en el eje trasero, no presenta impedimentos para usar aperos suspendidos de los tres puntos del tractor, esto según el

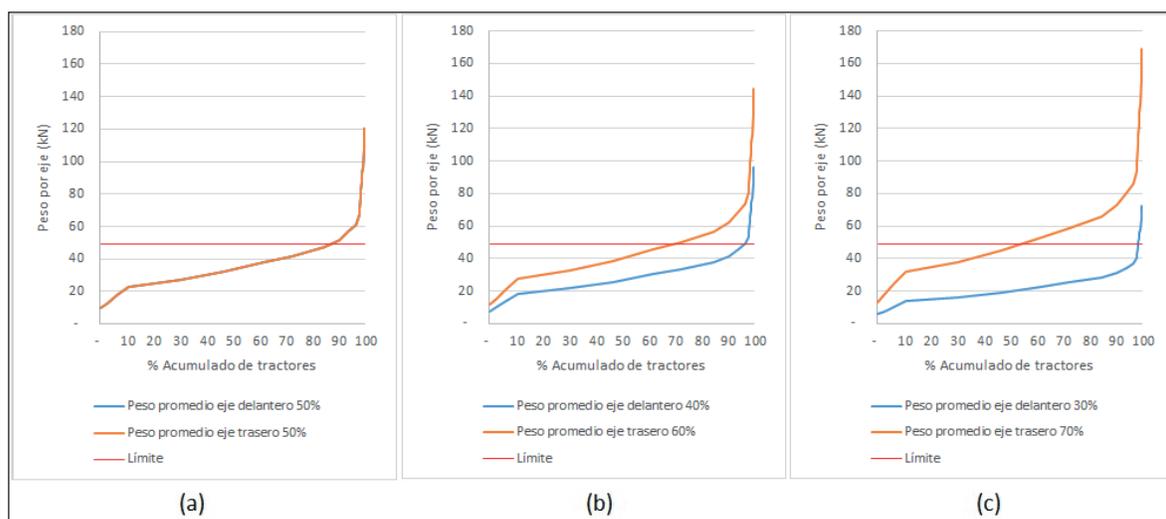


Figura 2. Escenarios de balance estático del peso del conjunto tractor e implemento de suspensión entre ejes delantero y trasero del tractor (a) 50 %-50 %, (b) 40 %-60 %, (c) 30 %-70 %. **Fuente:** elaboración propia.

peso límite de su capacidad de levante. La potencia neta promedio del tractor, hasta ese rango de peso, es de 81,82 kW (aproximadamente 110 HP), valor muy cercano al recomendado máximo en el reglamento de la Ley de Uso, Manejo y Conservación de suelos (100 HP). Con el balanceo estático adecuado de pesos, el resto del parque de maquinaria analizada (15 %) puede usar implementos de tiro sin restricciones de peso estático en los ejes del tractor, según su capacidad máxima de levante.

Dado que el escenario ideal para el cuidado de la máquina y del recurso suelo es cuando el balance de pesos entre el eje delantero y el eje trasero es del 40 % y del 60 %, respectivamente; por lo que, para equipos dentro del rango del peso de conjunto y potencia, se recomienda incluir dentro de los procedimientos de buenas prácticas agrícolas, el balanceo estático de la maquinaria. El balanceo debe ser tanto estático como en operación, con el fin de mantener la vida útil de los equipos y no influir, excesivamente, en la degradación del suelo con el uso de la maquinaria.

Agradecimientos

Al Instituto Nacional de Seguros, al Laboratorio de Ecología Urbana de la Universidad Estatal a Distancia y a la Escuela de Ingeniería Agrícola del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Referencias

- Arrazate-Oropeza, B., Gómez-Calderón, N., Villagra-Mendoza, K. (2016). *Comparación de patinaje bajo diferentes tipos de labranza de suelo*. In XII Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingeniería Agrícola (p. 649). Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Arvidsson, J., Keller, T. (2011). *Comparing penetrometer and shear vane measurements with measured and predicted mouldboard plough draught in a range of Swedish soils*. Soil and Tillage Research, 111(2), 219–223. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.10.005>
- ASABE. ASAE Standarts S495. *Uniform Terminology for Agricultural Machinery Management* (2006).
- Deere, J. (2012). *Manual de operación y mantenimiento John Deere 6405*.
- Gasso, V., Sørensen, C., Oudshoorn, F., Green, O. (2013). *Controlled traffic farming: A review of the environmental impacts*. European Journal of Agronomy, 48, 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2013.02.002>
- Gómez-Calderón, N., Villagra-Mendoza, K., Solórzano-Quintana, M. (2018). *La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria)*. Revista Tecnología En Marcha, 31(1), 170. <https://doi.org/10.18845/tm.v31i1.3506>
- Gutiérrez-Rodríguez, F., González-Huerta, A., Pérez-López, D., Franco-Mora, O., Morales-Rosales, E., Saldívar-Iglesias, P., Martínez-Rueda, C. (2012). *Compactación Inducida por el Rodaje de Tractores Agrícolas en un Vertisol*. Compaction Induced by Breaking of Agricultural Tractors in Vertisol. Terra Latinoamericana, 30(1), 1–7.
- Hartge, K., Horn, R. (2016). *Essential Soil Physics*. (R. Horton, R. Horn, J. Bachmann, & S. Peth, Eds.) (1st.Englis). Schweizerbart Science Publishers, Stuttgart, Germany: Schweizerbart Science Publishers.
- Horne, R., Hartge, K.(2016). *Essential Soil Physics*. (R. Horton, R. Horn, J. Bachmann, & S. Peth, Eds.) (First). Stuttgart, Germany: Schweizerbart Science Publishers. Retrieved from www.schweizerbart.com/9783510652884
- Jorajuria, D., Draghi, L. (2000). *Sobrecompactación del suelo agrícola parte I: influencia diferencial del peso y del número de pasadas*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 4(3), 445–452.
- Keller, T., Arvidsson, J. (2016). *Soil & Tillage Research A model for prediction of vertical stress distribution near the soil surface below rubber-tracked undercarriage systems fitted on agricultural vehicles*. Soil & Tillage Research, 155, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.014>
- Lal, R., Shukla, M. (2005). *Principles of Soil Physics*. (I. Marcel Dekker, Ed.). New York, USA: Taylor & Francis e-Library.
- Ministerio de Agricultura y Ganadería [MAG]. *Ley para el Uso, manejo y conservación de suelos* (1998). Costa Rica.
- Pérez, L. (2012). *Influencia de la maquinaria agrícola sobre la variabilidad espacial de la compactación del suelo*. Aplicación de la metodología geoestadística-fractal. Universidad Politécnica de Madrid.

- Ribes, J., Marcos, N., Aguera, J., Blanco, G. (2005). *Estudios de compactación de suelos: neumáticos y tractores*. *Vida Rural*, 1(1), 48–52.
- Salem, H., Valero, C., Muñoz, M., Rodríguez, M., Silva, L. (2015). [5] *Short-term effects of four tillage practices on soil physical properties, soil water potential, and maize yield*. *Geoderma*. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.08.014>
- Serrano, J., Peça, J., Silva, J., Márquez, L. (2009). *The effect of liquid ballast and tyre inflation pressure on tractor performance*. *Biosystems Engineering*, 102(1), 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.10.001>
- Terminiello, A., Balbuena, R., Claverie, J., Casado, J. (2000). *Compactación inducida por el tránsito vehicular sobre un suelo en producción hortícola*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 4(2), 290–293.
- Vaz, C., Manieri, J., de María, I., Tuller, M. (2011). *Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content*. *Geoderma*, 166(1), 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.016>