



Compresión vertical inducida al suelo durante la cosecha mecánica de *Saccharum spp.* en el Valle del Cauca, Colombia

Vertical Compression Induced to the Soil During the Mechanical Harvesting of *Saccharum spp.* in Valle del Cauca, Colombia

Sebastian Saavedra-Rincón* <https://orcid.org/0000-0001-6911-2818>

Óscar Chaparro-Anaya <https://orcid.org/0000-0001-5834-0786>

Universidad Nacional de Colombia – Sede Palmira. Palmira, Valle del Cauca, Colombia.

*Autor de correspondencia: ssaavedrar@unal.edu.co

Recepción: 30 de abril de 2023

Aceptado: 9 de junio de 2023

Resumen

Objetivo. Caracterizar los esfuerzos verticales transmitidos al suelo por la maquinaria agrícola empleada durante la operación de cosecha mecánica de *Saccharum spp.* (caña de azúcar) con vagones autovolteo en dos suelos del Valle del Cauca, Colombia, mediante el desarrollo de un dispositivo electrónico para la medición de esfuerzos de compresión en el suelo. **Métodos.** Los componentes empleados para la construcción del sensor fueron: una placa microcontroladora, un módulo amplificador de señales eléctricas AD620, una pantalla LCD, un transductor de esfuerzos de compresión con capacidad nominal de 10 Mg. Se cuantificaron los esfuerzos de compresión transmitidos al suelo por el sistema de cosecha de caña con vagones autovolteo en dos suelos hasta los 50 cm de profundidad y se relacionaron con el fenómeno de compactación a través de las propiedades densi-

Abstract

Objective. To characterize the vertical forces transmitted to the soil by agricultural machinery used during the mechanical harvesting operation of *Saccharum spp.* (sugarcane) with self-turning wagons in two soils of the Valle del Cauca, Colombia, through the development of an electronic device for measuring compression forces in the soil. **Methods.** The components used for the construction of the sensor were: a microcontroller board, an AD620 electric signal amplifier module, an LCD screen, and a compression force transducer with a nominal capacity of 10 Mg. The compression forces transmitted to the soil by the sugarcane harvesting system with self-turning wagons were quantified up to a depth of 50 cm and were related to the phenomenon of compaction through the properties of apparent density in wet conditions and mechanical resistance to penetration.

dad aparente en húmedo y resistencia mecánica a la penetración. **Resultados.** Se encontró que la llanta trasera del tractor transmitió los mayores esfuerzos de compresión. A la profundidad de 15 cm los valores fueron de 120.42 kPa y 108.29 kPa, mientras que a 50 cm fueron de 35.52 kPa y 29.46 kPa. Los esfuerzos transmitidos por la maquinaria elevaron los valores de densidad aparente en húmedo y la resistencia mecánica a la penetración por encima de los valores críticos para el desarrollo de la caña de azúcar. **Conclusión.** El tránsito intensivo de maquinaria sobre el suelo induce esfuerzos de compresión verticales, que pueden resultar en la compactación de la masa de suelo.

Palabras clave

Compactación, edafología, presión de contacto, maquinaria agrícola.

Results. It was found that the rear tire of the tractor transmitted the highest compression forces. At a depth of 15 cm, the values were 120.42 kPa and 108.29 kPa, while at 50 cm, they were 35.52 kPa and 29.46 kPa. The forces transmitted by the machinery increased the values of apparent density in wet conditions and mechanical resistance to penetration above critical values for the development of sugarcane.

Conclusion. The intensive traffic of machinery on the soil induces vertical compression forces, which can result in soil compaction.

Keywords

Compaction, edaphology, contact pressure, agricultural machinery.

Introducción

Cuando la maquinaria agrícola se desplaza sobre el suelo, ejerce una presión sobre la superficie de contacto de sus sistemas de rodamiento. Esta presión depende del peso y la presión de inflado o contacto de la maquinaria y se distribuye de manera similar a una parábola. Los valores más altos se registran en la superficie del suelo y en el centro geométrico de la huella generada por los sistemas de rodamiento, ya sean llantas u orugas. A medida que se profundiza en el perfil del suelo y se aleja de los bordes de la huella, la magnitud de la presión disminuye (Koolen y Kuipers, 1983; Calderón y Yañez, 2019; Keller *et al.*, 2019).

La compactación de los suelos agrícolas está estrechamente relacionada con la presión ejercida por la maquinaria agrícola sobre la masa de suelo. La magnitud de la compactación depende de factores como la textura, la estructura y la humedad del suelo al momento del tránsito de la maquinaria. La compactación puede tener consecuencias negativas en las producciones agrícolas, ya que reduce la porosidad del suelo, dificulta la infiltración de agua y aire, y limita el crecimiento y desarrollo de las plantas. Todo esto puede llevar a una disminución de los rendimientos y una pérdida de calidad en las cosechas (Saavedra y Chaparro, 2022).

La compactación del suelo es especialmente preocupante en sistemas de producción agrícola que utilizan maquinaria pesada y realizan múltiples pasadas sobre una misma unidad de suelo. Este es el caso de los sistemas de producción de *Saccharum spp.* (caña de azúcar) durante la cosecha, cuando se emplean equipos de gran tamaño y masa. La intensidad de tráfico (IT) en estos sistemas puede ser muy alta, lo que provoca un aumento

de la resistencia a la penetración y la densidad del suelo, lo que a su vez puede limitar el crecimiento y desarrollo de las plantas de caña de azúcar (López-Bravo *et al.*, 2022).

En Colombia, la producción de caña de azúcar es una actividad agrícola intensiva que se concentra en el valle geográfico del río Cauca, para las operaciones de cosecha mecánica de la caña se utiliza una flota de maquinaria compuesta normalmente por una cosechadora, dos tractores y vagones de autovoltteo para la carga y transporte del material cosechado. Durante la ejecución de la operación de cosecha, la maquinaria sigue un patrón de navegación que origina diferentes IT distribuidas espacialmente sobre la masa de suelo. Este patrón de navegación puede tener un impacto significativo en la compactación del suelo y, por lo tanto, en la calidad y productividad del cultivo.

Se reporta que la máxima IT durante una operación convencional de cosecha mecánica en el valle geográfico del río Cauca puede alcanzar valores de 745.45 Mg.km/ha; magnitudes que corresponden al tránsito sucesivo de la cosechadora (dos veces), el tractor (cuatro veces) y el vagón de autovoltteo (cuatro veces) sobre una misma unidad de suelo; valores de IT que favorecen la compactación al incrementar la densidad y la resistencia mecánica a la penetración del suelo hasta una profundidad de 50 cm (Rodríguez y Valencia, 2012; Saavedra y Chaparro, 2022).

La producción de alimentos de manera sostenible en un mundo con recursos escasos y un clima cambiante representa un gran desafío. Las tecnologías de la información ofrecen a la agricultura la oportunidad de proporcionar soluciones innovadoras a estos desafíos complejos. Es esencial que las ciencias aplicadas a la agricultura respalden el diseño y uso de tecnologías digitales para lograr resultados beneficiosos en la producción agrícola, minimizar los impactos negativos en el medioambiente y evitar consecuencias no deseadas como la compactación del suelo. Por lo tanto, la investigación y el desarrollo de tecnologías agrícolas bajo el concepto de la agricultura digital deben ser una prioridad para satisfacer la creciente demanda de alimentos y contribuir a la sostenibilidad de la agricultura (Shepherd *et al.*, 2018).

El objetivo de la investigación fue caracterizar los esfuerzos verticales transmitidos al suelo por la maquinaria agrícola empleada durante la operación de cosecha mecánica de caña de azúcar con vagones autovoltteo en dos suelos del Valle del Cauca mediante el desarrollo de un dispositivo electrónico para la medición de esfuerzos de compresión en el suelo.

Materiales y métodos

Desarrollo del sensor de esfuerzo de compresión

En la construcción del sensor de esfuerzo de compresión se utilizaron los siguientes componentes: una placa microcontroladora basada en el chip ATmega328P que recibe señales eléctricas y las convierte en señales analógicas, un módulo amplificador de señales eléctricas AD620, una pantalla LCD, un transductor de esfuerzos de compresión con capacidad nominal de 10 Mg y sensibilidad nominal de 2 ± 0.1 mV/V, que está protegido por un soporte antivuelco de acero inoxidable con una superficie de contacto de 160 cm². Además, se incluyó una batería de 12 V y una computadora en el proceso.

La programación de la placa microcontroladora para relacionar los datos análogos con esfuerzos de compresión, se realizó en el ecosistema de creación electrónica de código abierto Arduino, que se basa en el lenguaje de programación C++ y la calibración del sensor de esfuerzo de compresión se realizó con una maquina universal de ensayos (compresión) con capacidad de 100 kN, donde se sometió al sensor a esfuerzos que alcanzaron hasta aproximadamente los 1 230.11 kPa. Los datos que arrojaron la máquina universal y el sensor de esfuerzos se sometieron a un análisis de varianza, una prueba de correlación de Pearson, y se estimó el error estándar como indicador del grado de diferencia del valor medido por el sensor con respecto al parámetro considerado real (valor de la maquina universal de ensayos).

Área de estudio

El área de estudio se localizó en el departamento del Valle del Cauca, Colombia, y comprendió dos porciones de suelo sembrados con caña de azúcar para producción orgánica con la variedad CC 05-430. En cada porción de suelo se estableció una selección aleatoria sistemática de tres lugares de ensayo contiguos, ubicados en el centro de tres entresurcos diferentes para ser sujetos de estudio, durante la operación de cosecha mecánica. Según las coordenadas geográficas WGS84 la primera porción de suelo (suelo A) se ubicó en 3°34'20.64" longitud N - 76°16'19.92" latitud O y la segunda porción (suelo B) en 3°35'54.24" longitud N - 76°18'55.08" latitud O.

El suelo A está ubicado en un área con propiedades biofísicas relativamente homogéneas, que se puede caracterizar por cobijar suelos de textura franca fina y franca fina sobre arcillosa y con contenido de arcilla menor del 35%; moderadamente bien drenados y bien drenados, así como moderadamente profundos y profundos; se encuentran ubicados en un relieve plano (pendientes de 0-1%) con permeabilidad alta, moderada y baja; dentro de una región con déficit de humedad y rendimientos promedios de 130 Mg de caña de azúcar por hectárea. El suelo B en un área con suelos de texturas finas y contenidos de arcilla entre 35 y 60%, moderadamente drenados y bien drenados, moderadamente profundos y bien profundos; con permeabilidades altas, moderadas y bajas; dentro de una región con humedades menores a 200 mm/año y rendimientos promedios de 142 Mg de caña de azúcar por hectárea (Carbonell-González *et al.*, 2011).

Cargas y presiones de inflado y contacto

En la operación de cosecha se usó una maquina cosechadora con una presión estimada de contacto entre la oruga y el suelo de 156.9 kPa, un tractor con presiones de inflado de 103.4 kPa (llantas delanteras) y 158.6 kPa (llantas traseras) y un vagón autovolteo con presión de 296.5 kPa en sus llantas delanteras y traseras.

Muestreo y variables de interés

En las dos porciones de suelo seleccionado, para cada lugar de ensayo, las variables de interés fueron resistencia mecánica a la penetración promedio (RP) a 50 cm de profundidad, densidad aparente en húmedo (DaH) estimada hasta los 5 cm de profundidad

y esfuerzos de compresión causados por el tránsito de la maquinaria estimados hasta los 50 cm de profundidad. La medición con el sensor de los esfuerzos de compresión causados, se realizaron de la siguiente forma: para cada porción de suelo se evaluaron los esfuerzos inducidos por el tránsito de la maquinaria a una velocidad de 1 km/h en el siguiente orden: primero maquina cosechadora e inmediatamente después el tractor con el vagón autovolteo, a tres profundidades (15, 30 y 50 cm), cada profundidad evaluada correspondió a un lugar de ensayo. Se recolectó información sobre las condiciones iniciales (testigo) del suelo A y B en términos de RP y DaH y posteriormente cada lugar de ensayo se sometió a tres IT diferentes. Para cada IT se hizo muestreo de las variables RP y DaH en cada lugar de ensayo pertenecientes al suelo A y B, lo anterior dando lugar a los tratamientos (cuadro 1) del experimento y configurando el diseño experimental como completamente al azar.

Para ubicar el sensor, se excavaron orificios en cada lugar de ensayo; los datos de DaH con los cilindros se tomaron directamente sobre la masa de suelo ubicada encima del sensor, y los datos de RP se tomaron en las proximidades de la masa de suelo donde se ubicó el sensor.

Para propósitos de caracterización, en el suelo A y B se tomó una muestra dentro de las fronteras espaciales de los lotes antes de la operación de cosecha mecánica, para conocer en términos generales los contenidos de humedad por unidad de masa de suelo (%W), siguiendo el método planteado por Lucero-Vega *et al.* (2017), y los límites de los estados de consistencia plástico y líquido, siguiendo el método planteado por Hernández-Sánchez *et al.* (2019), así como su distribución de tamaño de partículas, siguiendo el método de Bouyoucos. Además, se realizó una medición de los esfuerzos de compresión causados directamente sobre el sensor, haciendo coincidir la superficie de contacto del soporte antivuelco que protege la celda de carga con la superficie del suelo.

Cuadro 1
Tratamientos del experimento

Tratamientos	Descripción	IT (Mg.km/ha)
Testigo	Condiciones iniciales antes de cosecha mecanizada	0.00
IT1	Dos pasadas de cosechadora, tractor y vagón autovolteo	478.79
IT2	Dos pasadas de cosechadora y tres pasadas de tractor y vagón autovolteo	612.12
IT3	Dos pasadas de cosechadora y cuatro pasadas de tractor y vagón autovolteo	745.45

*Valores de IT corresponden a las planteadas por Saavedra y Chaparro (2022).

Para la medición de RP se usó un sensor penetrómetro electrónico para mediciones en el sitio con las siguientes especificaciones técnicas: ángulo de cono de 60° y 1 cm² de superficie de cono (Davidson, 1965); para la estimación de la DaH se usó un cilindro de acero inoxidable con puntas afiladas, con las siguientes dimensiones: diámetro de 5 cm, altura de 5 cm y volumen aproximado de 392 cm³.

Análisis de la información

Las variables RP, DaH se sometieron a pruebas de la estadística descriptiva para el total de los datos y discriminados por tratamiento, la variable RP se sometió a prueba Shapiro-Wilk de distribución normal ($\alpha = 0.05$) para el total de los datos y análisis de varianza para determinar la significatividad estadística ($\alpha = 0.05$) de las diferencias observadas entre los tratamientos. Cuando existieron diferencias significativas, se utilizó la prueba Post Hoc de Diferencia Honesta Significativa de Tukey ($\alpha = 0.05$) para perfilar cuál o cuáles tratamientos fueron diferentes entre sí.

Los datos de esfuerzos de compresión causados se graficaron con relación al tiempo, durante el tráfico sobre los lugares de ensayo para cada una de las profundidades evaluadas; se estimaron los esfuerzos máximos causados para cada profundidad y se relacionaron con los esfuerzos causados directamente sobre el sensor a través del indicador %amortiguación que matemáticamente se expresa según la ecuación 1, donde i hace referencia a la profundidad evaluada.

$$\%amortiguación = \left(1 - \frac{\text{esfuerzo causado}_i}{\text{esfuerzo causado sobre la superficie}}\right) * 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Las pruebas de la estadística descriptiva y normalidad, los análisis estadísticos para determinar diferencias significativas entre los tratamientos y los métodos para correlacionar los datos del sensor y la maquina universal de ensayos, se programaron con los módulos especializados del ecosistema Python (Python 3.9.5): pandas v1.2.4, SciPy v1.20.3, NumPy v1.20.0, statsmodels v0.12.2 y scikit-learn v1.1.1.

Resultados

Desarrollo del sensor de esfuerzo de compresión

La combinación de los elementos eléctricos, electrónicos y la programación del micro-controlador dieron lugar a un sensor de esfuerzo de compresión (figura 1), con una capacidad máxima de 6 131.25 kPa (equivalente a una señal eléctrica de 5 V y una señal analógica de 1 023) y una sensibilidad de 5.13 kPa (equivalente a una señal eléctrica de 4.88 mV y una señal analógica de 1), capaz de mostrar los información capturada a razón de un segundo por dato en una pantalla LCD y transmitir la información a una computador para su almacenamiento. El coeficiente de correlación de Pearson arrojó un valor de 0.99, que indica una cuasi correlación positiva perfecta entre los datos registrados por el sensor durante la calibración con la maquina universal de ensayos. El error estándar de los datos del sensor con respecto a los datos de la maquina universal de ensayos durante la calibración fue de 10.31 kPa.

Base de datos – variables de interés

Para cada porción de suelo (A y B) se recolectó: 12 datos para la propiedad DaH, cuatro datos por lugar de ensayo y un dato por tratamiento; 60 datos para la propiedad RP,

20 datos por lugar de ensayo y cinco datos por tratamiento; para los esfuerzos causados se recolectó un total de 69 datos, 23 por lugar de ensayo, 11 datos para IT1, seis datos para IT2 y seis para IT3; para un total de 138 datos por porción de suelo y 276 datos para la totalidad del experimento.

Figura 1

Sensor de esfuerzo de compresión en calibración con máquina universal de ensayos



Condiciones iniciales y estadística descriptiva

Las condiciones iniciales de las propiedades DaH y RP para el suelo A son de 1.43 Mg/m³ y 1.54 MPa, respectivamente; y para el suelo B son de 1.36 Mg/m³ y 1.39 Mpa. Al momento de la experimentación %W en el suelo A fue de 25.81% y en el B de 19.96%. La distribución de partículas en el suelo A fue: arcilla 21.6%, limo 46.0% y arena 32.4%; y en el suelo B: arcilla 48%, limo 26 % y arena 26%. Los límites plásticos y líquidos en el suelo A en términos %W fueron: 25 y 41%, respectivamente; y en el suelo B de 16.5 y 39.8%, respectivamente. La estadística descriptiva de las bases de datos se presenta en el cuadro 2.

Análisis de varianza – resistencia mecánica a la penetración

Se puede decir para la variable RP, por la cantidad de datos, que la media de la distribución de la muestra tiende a ser normal y simétrica; por lo que las bases de datos cumplieron con los supuestos para ser sometida a pruebas de la estadística (Diez *et al.*, 2019).

Los análisis de varianza para la variable RP en los suelos A y B (cuadro 3) evidenciaron que existieron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados durante la cosecha mecánica de caña de azúcar. Las diferencias estadísticas (cuadro 3) se manifestaron entre el testigo y las diferentes IT.

Cuadro 2
Estadística descriptiva bases de datos – suelo A y B

	Suelo A		Suelo B	
	DaH (Mg/m ³)	RP (Mpa)	DaH (Mg/m ³)	RP (Mpa)
Media	1.57	2.06	1.56	2.48
Mediana	1.57	2.11	1.58	2.48
Moda	1.43	0.87	1.37	1.62
Desviación estándar	0.12	0.65	0.13	1.07
Simetría	0.05	-0.23	-0.62	0.76
Normalidad P-valor	NA	0.55	NA	0.01
Mínimo	1.43	0.66	1.36	0.83
Máximo	1.73	3.41	1.71	5.44

*NA: No aplica.

Pese a la ausencia generalizada de diferencias estadísticas en términos de las magnitudes de RP entre los tratamientos IT1, IT2 e IT3 para cada uno de los suelos, se notó una tendencia al aumento de su magnitud en la medida que se incrementó la IT (cuadro 3); siendo menor en IT1, intermedio en IT2 y mayor en IT3. Frente al caso particular del suelo A, con relación al testigo IT1, IT2 e IT3, las diferencias entre las condiciones iniciales y posteriores, según los resultados, se debieron a la contribución de los tratamientos, esto por la similitud entre sus errores experimentales. Para el suelo B, en dichas diferencias y según los resultados, además de la contribución de los tratamientos también hubo mayor presencia de la variabilidad aleatoria, esto por lo diverso del error experimental del testigo frente a IT1, IT2 e IT3.

Cuadro 3
Diferencias entre tratamientos: variable RP – Suelo A y B

Suelo A					
Estadísticos	Testigo	IT1	IT2	IT3	Valor P
Medía ± EE (Mpa)	1.54±0.18a	2.01±0.17a	2.09±0.17b	2.14±0.16b	<0.001
Suelo B					
Estadísticos	Testigo	IT1	IT2	IT3	Valor P
Medía ± EE (Mpa)	1.39±0.09a	2.57±0.22b	2.77±0.21b	3.20±0.30b	<0.001

*IT: Intensidad de tráfico.

*EE: Error experimental.

*Media en filas con letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas según prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Caracterización de los esfuerzos de compresión inducidos por la maquinaria

El comportamiento temporal de los esfuerzos de compresión inducidos por el tránsito de la cosechadora, el tractor y el vagón autovolteo, sobre los lugares de ensayo de los suelos A y B en las profundidades y tratamientos evaluados, se pueden observar en la figura 2.

Los máximos esfuerzos registrados (cuadro 4) en el suelo A fueron inducidos por el tratamiento IT3 y en el suelo B fueron inducidos por el tratamiento IT1. En términos porcentuales, el efecto amortiguador de la masa de suelo se puede observar en el cuadro 4, tanto su media como discriminado por profundidades evaluadas.

Cuadro 4

Esfuerzos máximos inducidos durante la operación de cosecha mecánica

Profundidad	Cosechadora		Tractor		Vagón autovolteo	
	Suelo A IT3 (kPa)	Suelo B IT1 (kPa)	Suelo A IT3 (kPa)	Suelo B IT 1 (kPa)	Suelo A IT3 (kPa)	Suelo B IT1 (kPa)
Superficie	163.09		266.10		187.00	
15 cm	29.46	53.72	120.42	108.29	53.72	53.72
30 cm	17.33	41.58	84.03	77.97	53.72	47.65
50 cm	11.27	11.27	35.52	29.46	41.59	29.46
%Amortiguación						
Profundidad	Cosechadora		Tractor		Vagón autovolteo	
	Suelo A IT3 (%)	Suelo B IT1 (%)	Suelo A IT3 (%)	Suelo B IT1 (%)	Suelo A IT3 (%)	Suelo B IT1 (%)
15 cm	81.94	67.06	54.75	59.30	71.27	71.27
30 cm	89.37	74.50	68.42	70.70	71.27	74.51
50 cm	93.09	93.09	86.65	88.92	77.76	88.92
Media	88.13	78.22	69.94	72.97	73.43	78.23

*IT: Intensidad de tráfico.

*Los esfuerzos del tractor y vagón autovolteo corresponden a los generados por una de sus llantas traseras.

Discusión

El suelo A en términos generales se clasificó como franco y el suelo B como arcilloso, lo anterior debido a sus distribuciones de tamaños de partículas (Hillel, 2013). Los contenidos de humedad en los suelos A y B, al momento de las operaciones de cosecha, estuvieron cercanos al límite plástico, lo que pudo mitigar el efecto de los esfuerzos inducidos sobre la compactación en los suelos estudiados, al posiblemente no lograr una deformación plástica sin recuperación elástica (Villagra-Mendoza *et al.*, 2023).

El análisis de varianza para la variable RP (cuadro 3) evidenció diferencias significativas entre los tratamientos para los dos suelos de estudio. Para el suelo A, las diferencias se expresaron entre testigo e IT1 con IT2 e IT3; para el suelo B, las diferencias significativas se expresaron entre testigo con IT1, IT2 e IT3. En términos globales, la experimentación señaló diferencias significativas entre los tratamientos y el

testigo, pero no entre los tratamientos; esto acorde a lo concluido por López Báez *et al.* (2018) en cuanto la compactación tanto en la superficie como en el subsuelo es originada principalmente por el laboreo intensivo de los suelos. Por otro lado, se observa (cuadro 3) que los valores de RP incrementan en la medida que las intensidades de tráfico son mayores, de la misma forma que Rodríguez y Valencia (2012) advierten, en cuanto la menor compactación se causa por IT bajas.

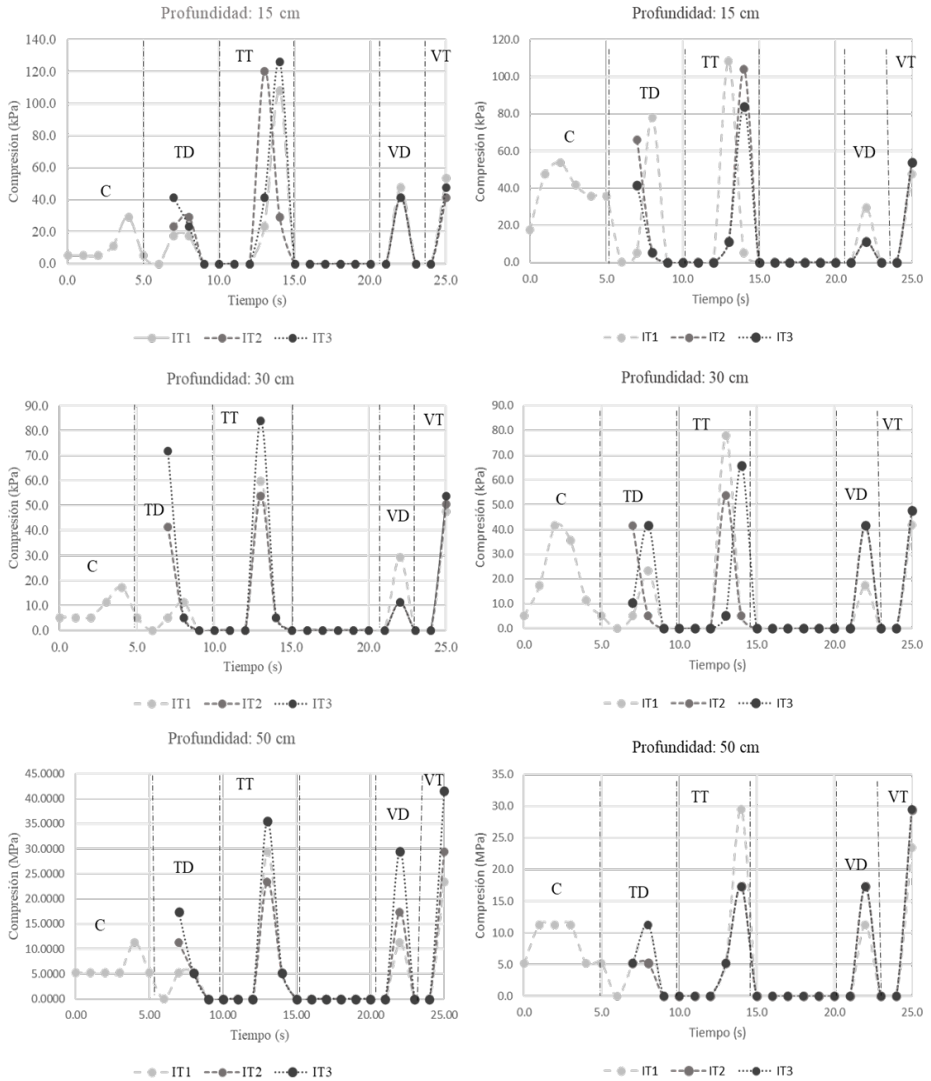
Las magnitudes de los valores de DaH en ambos suelos son similares en sus estadísticos, bien se puede decir que la propiedad, densidad aparente en los suelos, evaluada de la forma convencional no captura una porción significativa que permita un adecuado estudio de la compactación (Cueto *et al.*, 2009; Draghi *et al.*, 2015). En este sentido, para este estudio no se percibió que la DaH influenciara la susceptibilidad a la compactación; además, se advirtió que los suelos ya estaban en proceso de compactación con valores de densidad aparente cercanos a los 1.45 Mg/m³ (Panziera *et al.*, 2020).

Valores de resistencia mecánica a la penetración superiores a 2.50 MPa son restrictivos para el crecimiento de las raíces en cultivos de caña de azúcar (Panziera *et al.*, 2020). En el suelo A, para cada IT, no se alcanzaron esas magnitudes, siendo el mayor valor de RP igual a 2.14 MPa; en el suelo B se superaron esas magnitudes desde IT1, pasando por IT2 hasta llegar a IT3, siendo el mayor valor de RP igual a 3.20 MPa, valor correspondiente a IT3 (cuadro 3). Este comportamiento coincide con lo planteado por Masola (2020), cuando menciona que la susceptibilidad a la compactación aumenta con el contenido de arcilla. Por lo que es necesario plantear estrategias de mecanización diferencial, de acuerdo con las condiciones del suelo: contenido de humedad y textura.

La susceptibilidad a la compactación pareció ser determinante en los esfuerzos inducidos al suelo por el tránsito de la maquinaria durante la operación de cosecha mecánica. Pese a que el comportamiento de los esfuerzos inducidos (figura 2) fue similar en los dos suelos estudiados; los momentos, en términos de IT, en los que se alcanzaron los esfuerzos inducidos máximos fueron diferentes. Para el suelo A, menos susceptible a la compactación, se requirió mayor carga para generar compresión; contrario a lo ocurrido en el suelo B, que logró valores de compresión altos desde el primer momento que se sometió a cargas externas.

Los valores de esfuerzos inducidos por la maquinaria en la superficie (cuadro 4) medidos con el sensor, señalaron similitud con las presiones de contacto y de inflado; sin embargo, se logra percibir que existió una transferencia de carga del vagón autovolteo hacia el tractor. En cuanto el tractor se mueve y tira un implemento, ocurre un cambio en la distribución de cargas sobre su sistema de rodamiento, a lo que se llama transferencia de carga; cuando el implemento se ubica en la parte posterior del tractor, la transferencia ocurre del implemento hacia el eje trasero del tractor (Alcock, 1986). Con ayuda del sensor, para este estudio, la transferencia de carga del vagón al tractor se estimó en 36.26% y, concordando con lo reportado por Gysi *et al.* (2001), en cuanto a los esfuerzos provocados por una llanta de tractor con presión de inflado de 180 kPa son 3.1 veces superiores en la superficie, comparados con los esfuerzos inducidos a una profundidad de 30 cm en el suelo; para este estudio los valores comparativos fueron: suelo A con 3.17 veces y suelo B con 3.41 veces.

Figura 2
Esfuerzos de compresión inducidos durante el tránsito de la maquinaria a tres profundidades



*Las gráficas del margen derecho corresponden al suelo A y margen izquierdo al suelo B.
**C: oruga cosechadora; TD: llanta delantera del tractor; TT: llanta trasera del tractor; VD: llanta delantera del vagón y VT: llanta trasera del vagón.

La distribución espacial de los esfuerzos de compresión en la vertical, en los suelos A y B (cuadro 4), pudo ser caracterizada gracias al sensor de esfuerzos de compresión y mostró una distribución cuasi parabólica; es decir, la propagación de la compactación tendió a ser mayor en los estratos superficiales y menor en los subsuperficiales; distribución

que coinciden con lo reportado por Koolen y Kuipers (1983), Keller *et al.* (2019) y Seehusen *et al.* (2019).

La media del indicador %amortiguación (cuadro 4) parece señalar que el suelo soporta mejor los esfuerzos mecánicos inducidos de bajas magnitudes, al expresar valores más altos para la maquina cosechadora (88.13 y 78.22%), el vagón autovoltteo (73.43 y 78.23%) y valores más bajos para el tractor (69.94 y 72.97%).

Según Shahgholi y Abuali (2015), cuando existen esfuerzos externos el suelo se comprime y en usencia de ellos el suelo se expande, dependiendo este comportamiento de la cantidad de puntos de contacto entre los sólidos, íntimamente relacionado con su textura (Ellies Sch *et al.*, 2000). Lo mencionado y los resultados obtenidos de la distribución de los esfuerzos (cuadro 4 y figura 2), sugiere que, en los suelos menos susceptibles a la compactación por sus condiciones texturales (como el suelo A), la propagación de los esfuerzos de compresión es menor por la cantidad de puntos de contacto entre los sólidos (arcilla 21.6%, limo 46.0% y arena 32.4%); por ende, requiere de mayor IT (745.45 Mg.km/ha¹) para alcanzar los máximos esfuerzos (cuadro 1 y cuadro 4); en comparación con los suelos más susceptibles a la compactación (como el suelo B), donde la propagación de los esfuerzos de compresión fue mayor, posiblemente debido a una mayor cantidad de puntos de contacto entre los sólidos (arcilla 48%, limo 26 % y arena 26%); en consecuencia, con IT más bajas (478.79 Mg.km/ha) se alcanzaron los máximos esfuerzos (cuadro 1 y cuadro 4).

Se vislumbra que el suelo más susceptible a la compactación tiene una capacidad superior de volver a sus condiciones mecánicas iniciales - resiliencia (cuando no llegan a ser irreversibles) frente a los suelos menos susceptibles; esto en cuanto, en el suelo B, la tendencia de los esfuerzos de compresión fue disminuir en la medida que aumentaba la IT, y en el suelo A la tendencia de los esfuerzos fue al aumento en la medida que la magnitud de IT crecía (figura 2). No obstante, esos resultados no son reflejo del fenómeno de compactación; si bien el suelo A estuvo cerca de los límites establecidos para considerarlo compactado, el suelo B supero dichos límites con creces.

Aunque se discute que la cuestión planteada —y se sabe que suelos con límites líquidos similares, pero con índices de plasticidad que crecen (suelo B con respecto al suelo A), presentan mayor tenacidad (resistencia a ser suprimido) y resistencia en seco (Villalaz, 2004)— es necesario llevar a cabo más estudios en torno a este fenómeno en los suelos de uso agrícola.

La aplicación de la tecnología, la programación y la electrónica para la captura, procesamiento y análisis de información proveniente de los procesos de mecanización agrícola, permite plantear discusiones alrededor de la relación suelo-máquina e iniciar el recorrido hacia nuevas estrategias de gestión del suelo y la maquinaria durante las operaciones en campo, que permitan atender los desafíos que enfrenta el sector de la producción de alimentos.

Conclusiones

El tránsito intensivo de maquinaria sobre el suelo induce esfuerzos de compresión verticales, que pueden resultar en la compactación de la masa de suelo. En términos de textura y contenidos de humedad cercanos a límite plástico, los suelos menos susceptibles a la compactación son aquellos con bajo porcentaje de arcilla, y por defecto los más susceptibles son aquellos con porcentajes altos de arcilla.

En el suelo de textura arcillosa se observó que las intensidades de tráfico provocaron compactación del suelo, lo que se reflejó en un incremento importante de los valores de resistencia a la penetración frente a las condiciones iniciales. En el suelo de textura franca, se observó que las intensidades de tráfico no llegaron a provocar compactación del suelo, pese a que se evidenciaron incrementos en la resistencia a la penetración frente a las condiciones iniciales, estos fueron insuficientes.

Los esfuerzos máximos registrados por el sensor de esfuerzos de compresión durante el tránsito de la maquinaria en la operación de cosecha mecánica con vagones autovolteo en cada lugar de ensayo guardan relación con las presiones de contacto e inflado de las llantas del tractor, vagón autovolteo y cosechadora, en cuanto a mayor presión de contacto e inflado mayor es la magnitud de la compresión vertical inducida.

Literatura citada

- Alcock, R. (1986). Tractor-implement systems. Avi Publishing Co. Estados Unidos, Connecticut, Westport. 162 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-6879-3>
- Calderón, N.G. y Yáñez, J.R. (2019). Degradación del suelo por compactación en función de la distribución del peso en los ejes de los tractores agrícolas. *Yúlök Revista de Innovación Académica*, 3(2): 4-50.
- Carbonell-González, J.; Quintero-Durán, R.; Torres-Aguas, J.S.; Osorio-Murillo, C.A.; Isaacs-Echeverri, C.H.; Victoria-Kafure, J.I. (2011). Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca (cuarta aproximación): principios metodológicos y aplicaciones. Cali, Cenicafé. Serie Técnica No. 38. 119 p.
- Cueto, O.G.; Coronel, C.E.I. y Suárez, M.H. (2009). Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(2): 57-63.
- Davidson, D.T. (1965). Penetrometer measurements. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*, 9: 472-484.
- Diez, D.; Barr, C. y Cetinkaya-Rundel, M. (2019). One-Sample Means with the T-Distribution. In: D. Diez, M. Cetinkaya-Rundel, y C. Barr (Eds), *OpenIntro Statistics Fourth Edition*. Estados Unidos: OpenIntro Ed. 251-261 p <https://www.openintro.org/book/os/>
- Draghi, L.; Jorajuria Collazo, D.; Sarena, D.; Bailleres, M.; Melani, E.; Castillo, J.M.; Cerisola, C. y Palancar, T. (2015). Impacto del tránsito en dos sistemas de siembra. *Agrociencia*. 19(2): 59-67.
- Ellies Sch, A.; Smith R, R.; Cuevas B, J.; Dörner F, J. y Pröschle T, A. (2000). Efecto de la humedad y frecuencia del tránsito sobre la distribución de tensiones de distintos suelos. *Agro Sur*, 28(2), 60-68. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2000.v28n2-08>
- Gysi, M.; Maeder, V. and Weiskopf, P. (2001). Pressure distribution underneath tires of agricultural vehicles. *Transactions of the ASAE*, 44(6): 1385. <https://doi.org/10.13031/2013.7001>
- Hernández-Sánchez, J.M.D.L.D.; Figueroa-Sandoval, B. y Martínez Menes, M.R. (2019). Propiedades físicas del suelo y su relación con la plasticidad en un sistema bajo labranza tradicional y no labranza. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(SPE22), 53-61. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i22.1858>
- Hillel, D. (1980). *Fundamentals of soil physics*. Academic press. Estados Unidos de América, Nueva York. 413 p.

- Keller, T.; Sandin, M.; Colombi, T.; Horn, R. y Or, D. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194: 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- Koolen, A. y Kuipers, H. (1983). *Agricultural soil mechanics*. Springer Science & Business Media. Berlín, Alemania. 252 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-69010-5>
- López Báez, W.; Reynoso Santos, R.; López Martínez, J.; Camas Gómez, R. y Tasistro, A. (2018). Diagnóstico de la compactación en suelos cultivados con maíz en la Región Fraylesca, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9(1): 65-79. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i1.848>
- López-Bravo, E.; Saucedo-Levi, E.R.; González-Cueto, O.; Herrera-Suárez, M. y Betancourt-Rodríguez, Y. (2022). Efectos de la cosecha mecanizada de la caña de azúcar sobre el suelo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 31(1): 5-12.
- Lucero-Vega, G.; Troyo-Diéguez, E.; Murillo-Amador, B.; Nieto-Garibay, A.; Ruíz-Espinoza, F.H.; Beltrán-Morañes, F.A. y Zamora-Salgado, S. (2017). Diseño de un sistema de riego subterráneo para abatir la evaporación en suelo desnudo comparado con dos métodos convencionales. *Agrociencia*, 51(5): 487-505.
- Masola, M.J. (2020). Propagación lateral de la compactación por tránsito de la maquinaria agrícola: ¿afecta la calidad del suelo, el intercambio gaseoso y la productividad de los cultivos? Tesis de doctorado. Universidad Nacional del Litoral. Esperanza, Santa Fe, Argentina.
- Panziera, W.; de Lima, C.L.R.; Moura-Bueno, J.M.; Pauletto, E.A.; Silva, S.D.A.; Timm, L. C. y Stumpf, L. (2020). Spatial variability of soil physical attributes in sugarcane using different row spacings. *Australian Journal of Crop Science*. 14(9): 1399-1404. <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.09.p2394>
- Rodríguez, L. y Valencia, J. (2012). Impacto del tráfico de equipos durante la cosecha de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12(10), 1128-1136. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001000014>
- Saavedra, S. y Chaparro, Ó. (2022). Compactación inducida durante cosecha mecánica de *Saccharum spp.* y su relación con propiedades estructurales del suelo. *Avances en Investigación Agropecuaria*, 26(1): 155-176. <https://doi.org/10.53897/RevAIA.22.26.23>
- Seehusen, T.; Riggert, R.; Fleige, H.; Horn, R. y Riley, H. (2019). Soil compaction and stress propagation after different wheeling intensities on a silt soil in South-East Norway. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 69(4): 343-355. <https://doi.org/10.1080/09064710.2019.1576762>
- Shahgholi, G. y Abuali, M. (2015). Measuring soil compaction and soil behavior under the tractor tire using strain transducer. *Journal of Terramechanics*, 59: 19-25. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2015.02.007>
- Shepherd, M.; Turner, J.A.; Small, B. y Wheeler, D. (2018). Priorities for science to overcome hurdles thwarting the full promise of the ‘digital agriculture’ revolution. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(14): 5083-5092. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9346>
- Villagra-Mendoza, K.; Brenes-Cano, D. y Gómez-Calderón, N. (2023). Efecto del balanceo de cargas en los ejes de tractores agrícolas sobre la eficiencia de labranza y las propiedades físico-mecánicas de un suelo vertisol. *Agronomía Costarricense*. 47(1): 101-121. <https://doi.org/10.15517/rac.v47i1.53968>
- Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones (5ª ed.)*. Editorial Limusa. México. 650 p.