

Predicción de la compactación provocada por el tránsito en la cosecha de caña de azúcar

Prediction of compaction caused by the transit in sugarcane harvesting



<https://cu-id.com/2177/v33n3e04>

[✉]Omar González-Cueto^{1*}, [✉]Elvis López-Bravo¹, [✉]Yoel Betancourt-Rodríguez¹,
[✉]Richard Xavier Cevallos-Mera^{II}, [✉]Miguel Herrera-Suárez^{II}

¹Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Departamento de Ingeniería Agrícola, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

^{II}Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Manabí, Ecuador.

RESUMEN: La compactación del suelo debido al tráfico de maquinaria agrícola es una amenaza para la productividad y las funciones ecológicas del suelo. La predicción de los esfuerzos del suelo y la compactación que soporta el suelo durante la cosecha y el transporte son indicaciones fundamentales en las estrategias de prevención y remediación de la compactación del suelo. El objetivo de esta investigación fue predecir la compactación del suelo causada por cosechadoras y equipos de transporte durante la cosecha de caña de azúcar en suelos blandos. El tráfico de maquinaria se simuló utilizando el modelo TASC V3.0, se utilizó el Módulo 1 “Propagación de Esfuerzos y Daño al Suelo”. El sistema de máquinas utilizado para la cosecha de caña de azúcar estuvo formado por cosechadoras CASE IH 8800, y remolques basculantes 7CX (SC)-10 tirados por tractores YTO 1608 o XTZ 150K-09. Se introducen como datos parámetros de maquinaria y suelo. El uso del modelado TASC V3.0 permitió predecir la compactación del suelo causada por cosechadoras y equipos de transporte durante la cosecha de caña de azúcar en suelos blandos. Se obtuvo una compactación del suelo más severa durante el uso del remolque basculante 7CX (SC)-10 debido a la alta presión media de contacto y la alta carga de los neumáticos, lo que provocó una compactación severa del suelo hasta una profundidad de 0,37 m. El neumático trasero del tractor YTO 1604 provocó una fuerte compactación del suelo alcanzando 0,31 m de profundidad. En sentido general todos los equipos ocasionaron una severa compactación del suelo en la capa de labranza, por lo que se deben realizar trabajos de descompactación con el objetivo de aflojar el suelo en profundidad hasta 0.37 m para un buen desarrollo de los retoños de caña de azúcar.

Palabras clave: Presión media en el contacto, suelo arcilloso blando, TASC V3.0.

ABSTRACT: Soil compaction due to agricultural machinery traffic is a threat to soil productivity and soil ecological functions. The prediction of soil stresses and compaction that soil bear during the harvest and transport are fundamental indications in the prevention strategies and remediation of the soil compaction. The objective of this research was to predict soil compaction caused by harvesters and transport equipment during sugarcane harvest on soft soil. Machinery traffic was simulated using the TASC V3.0 model, Module 1 "Stress Propagation and Soil Damage" was used. The machine system used for harvest sugarcane were formed by harvesters CASE IH 8800, and tipping tows 7CX (SC)-10 pulling by tractors YTO 1608 or XTZ 150K-09. Parameters from machinery and soil are introducing as data. The use of modelling TASC V3.0 permitted to predict soil compaction caused by harvesters and transport equipment during sugarcane harvest on soft soil. More severe soil compaction was obtained during use of tipping tow 7CX (SC)-10 due to high mean contact pressure and high tire load, which caused severe soil compaction until a depth of 0.37 m. Rear tire of tractor YTO 1604 caused severe soil compaction too reaching 0.31 m of depth. In general sense all equipment caused severe soil compaction in tillage layer, therefore must be make decompactions works with the objective to loose soil in depth for a good developed of sugarcane ratoons.

Keywords: Mean Contact Pressure, Soft Clay Soil, TASC V3.0.

*Autor para correspondencia: Omar González-Cueto, e-mail: omar@uclv.edu.cu

Recibido: 15/12/2023

Aceptado: 14/06/2024

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

CONTRIBUCIONES DE AUTOR: **Conceptualización:** O. González. **Curación de datos:** Y. Betancourt. **Análisis formal:** O. González, E. López. **Investigación:** O. González, M. Herrera. **Metodología:** O. González y R.X. Cevallos. **Supervisión:** O. González. **Validación:** E. López, **Papeles/Redacción, proyecto original:** O. González, M. Herrera. **Redacción, revisión y edición:** O. González, R.X. Cevallos.

Artículo bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUCCIÓN

La compactación del suelo debido al tráfico de maquinaria agrícola es una amenaza para la productividad y las funciones ecológicas del suelo ([Guimarães et al., 2017](#)). La compactación afecta la sostenibilidad ambiental del suelo y provoca su degradación. La degradación del suelo es un deterioro a largo plazo de la función y la productividad de los ecosistemas causado por alteraciones a partir de las cuales el suelo no puede recuperarse sin ayuda. Se trata de un problema mundial acumulativo que ha aumentado del 15 por ciento de la superficie terrestre total en 1991 al 24 por ciento en 2008 ([Bai et al., 2008](#)).

Si la presión ejercida sobre el suelo por el tráfico de equipos agrícolas es menor que la resistencia del suelo, no se producirá deformación permanente y, por lo tanto, no se esperan daños al suelo. Si este no es el caso, entonces la compactación del suelo es inevitable ([Schjønning et al., 2015](#), [Stettler et al., 2014](#)). [ASAE/ASABE S526.4\(R2019\) \(2015\)](#) definió la compactación del suelo como la reducción de la porosidad y el colapso de la estructura del suelo cuando se somete a cargas superficiales. Daña la base física de la fertilidad del suelo, aumenta la resistencia mecánica para el crecimiento de las raíces y modifica la distribución y la conectividad del tamaño de los poros del suelo. Disminuye la infiltración y la recarga de aguas subterráneas, además de aumentar la escorrentía superficial, erosión del suelo e inundación ([Berli et al., 2015](#), [Keller et al., 2015](#), [Kuhwald et al., 2018](#)).

La compactación del suelo en tierras cultivadas afecta principalmente a la capa superior del suelo ([Nawaz et al., 2013](#)). La compactación de la capa superficial del suelo tiene lugar en la capa de labranza del suelo y la compactación del subsuelo tiene lugar a una profundidad debajo de la capa de labranza del suelo ([Alakukku et al., 2003](#)). La labranza primaria puede revertir la compactación de la capa superficial del suelo, pero la compactación del subsuelo persiste a largo plazo ([Kuhwald et al., 2018](#)). Investigaciones a largo plazo encontraron que la compactación del subsuelo no se alivia mediante procesos naturales y que la lixiviación de nutrientes y las emisiones de gases de efecto invernadero pueden intensificarse ([Stettler et al., 2014](#)).

En la actualidad, los tractores pesados se utilizan cada vez más en la agricultura intensiva porque ofrecen la posibilidad de trabajar con un número mínimo de pasadas en suelo agrícola ([Biris et al., 2019](#)). Estos tractores cuentan con sistemas motrices sobre orugas o neumáticos de alta flotación, de esta forma no se provocan presiones elevadas sobre la superficie del suelo. Sin embargo, la compactación del subsuelo por el tránsito de tractores está directamente relacionada con la carga por eje ([Botta et al., 2002](#),

[Botta et al., 2009](#), [González et al., 2016](#)). El Esfuerzo sobre el suelo es siempre una función del esfuerzo en la interfaz neumático-suelo, que es función tanto de la presión de inflado de los neumáticos como de la carga de las ruedas, así como de las propiedades de los neumáticos y las condiciones del suelo ([Arvidsson and Keller, 2007](#)).

Los principales factores que provocan compactación del suelo están relacionados con el tráfico de maquinaria y las propiedades del suelo. La carga por eje, la presión sobre el suelo, la presión de inflado de los neumáticos, la distribución de esfuerzos en la superficie del suelo, la intensidad del tráfico, la velocidad de avance y el patinaje son características de la maquinaria relacionadas con la compactación del suelo ([Biris et al., 2009](#), [González et al., 2009](#), [González et al., 2013](#), [Kuhwald et al., 2018](#), [Nawaz et al., 2013](#)). La textura del suelo, el tamaño de grano o el tipo de suelo ([Biris et al., 2019](#), [González et al., 2013](#), [Nawaz et al., 2013](#), [Silva et al., 2018](#)) estructura del suelo, contenido de materia orgánica, densidad aparente, contenido de humedad del suelo ([de Lima et al., 2018](#), [González et al., 2013](#), [Silva et al., 2018](#)) e historial de esfuerzos del suelo ([Berli et al., 2015](#), [Guimarães Júnnyor et al., 2019](#)) están asociados con la resistencia del suelo y en consecuencia a la compactación del suelo. Mas, el suelo es fuertemente dependiente de la humedad del suelo ([Botta et al., 2002](#), [Chamen et al., 2015](#), [Guimarães Júnnyor et al., 2019](#), [Kuhwald et al., 2018](#), [Stoessel et al., 2018](#)).

Entre los factores que influyen en la compactación del suelo, el contenido de humedad del suelo es el factor más importante ([Hamza and Anderson, 2005](#)). [González et al. \(2008\)](#) en condiciones de laboratorio evaluaron el efecto del contenido de humedad y la presión del suelo en la porosidad del suelo. Descubrieron que una presión sobre el suelo de 400 kPa, en un suelo Rhodic Ferralsol con un 25% de contenido de humedad, provoca un cambio menor en la porosidad que una presión sobre el suelo de 200 kPa en un suelo con un 35% de contenido de humedad. El contenido de humedad del suelo tiene una mayor influencia en la disminución de la porosidad que la presión sobre el suelo. Es decir, que el aumento del contenido de humedad del suelo provoca una reducción de la resistencia del suelo ([Hamza and Anderson, 2005](#)).

La predicción de los esfuerzos y la compactación del suelo se ha modelado mediante métodos numéricos y semianalíticos ([Défossez and Richard, 2002](#)). El método numérico más utilizado ha sido el método de elementos finitos ([González et al., 2013](#), [Nawaz et al., 2013](#), [Silva et al., 2018](#), [Biris et al., 2019](#)). Los modelos de compactación de suelos analíticos o semianalíticos tienen la ventaja de que suelen ser fáciles de usar y requieren pocos parámetros de entrada. Estos métodos han sido ampliamente utilizados en el modelado de

la compactación del suelo logrando predicciones satisfactorias de la transmisión de esfuerzos y el cambio de la densidad aparente (Keller and Lamandé, 2010). Entre estos modelos se encuentra SOCOMO desarrollado para calcular los esfuerzos del suelo bajo cargas en las ruedas (Van den Akker, 2004), SoilFlex, un modelo para la predicción de los esfuerzos y la compactación del suelo debido al tráfico agrícola. Este modelo permite predecir el área de contacto y la distribución de esfuerzos en el área de contacto a partir de parámetros de neumáticos fácilmente disponibles; es posible simular el paso de varias máquinas, incluidas, por ejemplo, máquinas de neumáticos, tractores con ruedas dobles y remolques con ruedas tándem (Keller et al., 2007). Schjonning et al. (2008) propusieron el modelo FRIDA que describe la huella del neumático mediante una superelipse y la distribución de esfuerzos mediante una función combinada exponencial (perpendicular a la dirección de conducción) y de ley potencial (a lo largo de la dirección de conducción). El modelo parece adecuado para describir la distribución de esfuerzos en la interfaz suelo-neumático.

Battiato and Diserens (2017) desarrollaron un modelo para predecir la compactación del subsuelo TASC (TYRES/TRACKS AND SOIL COMPACTION) como una aplicación Excel que consta de cinco módulos. El primer módulo permite una evaluación rápida de los riesgos de daños graves por compactación del suelo en el subsuelo teniendo en cuenta tanto las características del suelo como la carga de la máquina y el segundo módulo simula la curva fuerza de tracción-patinaje proporcionando también el límite más allá del cual se produce la falla del suelo superficial. Los otros módulos calculan la proporción de áreas transitadas, brindan acceso a los datos técnicos de más de 1270 neumáticos agrícolas y forestales y el último módulo proporciona información relacionado con la seguridad vial (Diserens et al., 2014). Este modelo ha sido aplicado por Guimarães Júnnyor et al. (2019) para la predicción del esfuerzo y la compactación del suelo debido a máquinas agrícolas en sistemas de cultivo de caña de azúcar. Los resultados indicaron estrategias para evitar la compactación del suelo por las máquinas utilizadas, incluidos ajustes en las cargas de las máquinas y cambios en el diseño de labranza y manejo.

En Cuba, la caña de azúcar siempre ha tomado un lugar sobresaliente en cuanto a la cantidad de área dedicada a su cultivo, llegando en la temporada 2020-2021 a las 300 000 ha cosechadas (ONEI, 2023). El uso de cosechadoras pesadas y equipos de transporte se ha identificado como una de las principales causas de compactación del suelo en el cultivo de caña de azúcar en Cuba (López-Bravo et al., 2022). Algunas áreas plantadas con caña de azúcar, en suelos plásticos arcillosos pesados durante lluvias intensas, no pueden cosecharse por

varias semanas y hasta meses debido al alto contenido de agua que almacena el suelo, causando pérdidas económicas considerables (Martínez-Ramírez et al., 2017).

La Empresa Azucarera José María Pérez, en Camajuaní, provincia de Villa Clara, en la región central de Cuba, presenta áreas con suelos Vertisoles (Hernández et al., 2015). En la UBPC Chiquí Gómez Lubián, perteneciente a este ingenio, la cosecha de caña de azúcar se realiza con CASE IH 8800, remolques basculantes 7CX (SC)-10 tirados por tractores YTO 1608 o XTZ 150K-09. Estos suelos permanecen húmedos durante varios días o semanas después de intensas lluvias y en muchos casos la cosecha se realiza en condiciones de suelo blando, lo que favorece la compactación del suelo. Después de la cosecha, las operaciones agrícolas para restablecer el estado inicial del suelo en la plantación, son una de las principales tareas en busca de lograr un buen rendimiento de los retoños.

La predicción de los esfuerzos del suelo y la compactación que sufre el suelo durante la cosecha y el transporte son indicadores fundamentales en las estrategias de prevención y remediación de la compactación del suelo. El objetivo de esta investigación fue predecir la compactación del suelo causada por cosechadoras y equipos de transporte durante la cosecha de caña de azúcar en suelos blandos.

MATERIALES Y METODOS

El tráfico de maquinaria se simuló mediante el modelo TASC V3.0 (Battiato and Diserens, 2017). Se utilizó el Módulo 1 "Propagación de Esfuerzos y Daño al Suelo". Los procedimientos utilizados para calcular los esfuerzos del suelo en profundidad, la determinación de la profundidad a la que se produce una compactación severa, así como el área de contacto neumático/estera con el suelo y la presión media de contacto se pueden revisar en Diserens (2009), Diserens et al. (2010), Diserens et al. (2011) and Diserens et al. (2014).

2.1 Simulación del suelo

Varios son los datos de entrada necesarios para la simulación del suelo. a) Humedad del suelo. El modelo incluye dos suelos característicos, como son los suelos forestales y agrícolas. Se deben seleccionar dos opciones de humedad del suelo: suelo agrícola húmedo a 1,8 pF o suelo agrícola seco a 2,5 pF. Se seleccionó el suelo agrícola húmedo. b) Textura del suelo a la profundidad máxima de labranza. El modelo muestra cinco texturas de suelo para seleccionar una y una definida por el usuario. Desde suelo arcilloso hasta suelo franco, limoso o arenoso. Si el contenido del suelo arcilloso y limoso se conoce, se utiliza el cuadro definido por el usuario y ambos contenidos se

ingresan en el software. Se seleccionó suelo arcilloso. c) Profundidad máxima de labranza. Profundidad máxima a la que se realizan los trabajos de labranza y se afloja el suelo. La profundidad de labranza generalmente utilizada en la zona investigada es de 0,20 m. d) Dureza del suelo. El modelo calcula la distribución de esfuerzos para tres durezas de la capa superior del suelo (firme, semifirme y blanda) o definidas por el usuario. Se seleccionó suelo blando.

2.2 Simulación de la maquinaria

El sistema de máquinas utilizado para la cosecha de caña de azúcar estuvo formado por cosechadoras CASE IH 8800 y remolques basculantes 7CX (SC)-10 tirados por tractores YTO 1604 o XTZ 150K-09. Los parámetros de la maquinaria se introducen como datos. Los datos técnicos de más de 1270 neumáticos agrícolas y forestales están disponibles en TASC como datos de entrada. Neumático/tipo de vía es la relación entre la altura del neumático y el ancho o vía del neumático; La estructura del neumático es una selección entre capas diagonales o radiales; El ancho de vía del neumático es el ancho del neumático o el ancho de vía; Diámetro del neumático/longitud de vía. Estos parámetros se introducen automáticamente si los neumáticos se seleccionaron de las tablas de datos. La carga de neumáticos/esteras es la carga máxima de neumáticos/esteras en kg. La presión de inflado de los neumáticos es la presión interna de los neumáticos en bar. La carga de los neumáticos se determinó pesando la carga por eje y posteriormente se dividió por dos. La presión de inflado de los neumáticos se determinó con un manómetro. La [Tabla 1](#) muestra los datos de la maquinaria y los neumáticos/esteras utilizados como datos de entrada en TASC.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados de la simulación como presión media de contacto, riesgo severo de compactación del suelo y esfuerzos verticales máximos propagadas al suelo se muestran en la [Tabla 2](#). La presión media de contacto estuvo de 42 hasta 197 kPa. La presión de contacto media menor la registró la cosechadora CASE IH 8800, debido a la gran superficie de contacto con el suelo de las estereras. La mayor presión de contacto la ejerció el remolque autobasculante 7CX (SC)-10. Este equipo presentó una alta presión de inflado de neumáticos (superior a la recomendada por el fabricante) y una elevada carga sobre neumáticos, dos factores con influencia directa en la presión de contacto del neumático con el suelo. La distribución de los esfuerzos en el suelo es función de ambos factores. Varias investigaciones han demostrado la dependencia de los esfuerzos de contacto medios y la distribución de los esfuerzos en el suelo de la presión de inflado y la carga de los neumáticos ([Arvidsson and Keller, 2007](#), [Keller, 2005](#)) y se han desarrollado algunas ecuaciones para predecir la presión de contacto media a partir de la presión de inflado. [Arvidsson and Keller \(2007\)](#) investigaron los esfuerzos máximos causadas por maquinaria agrícola a diferentes profundidades del suelo. Descubrieron que a 10 cm de profundidad, el esfuerzo aumentaba al aumentar la presión de inflado y al aumentar la carga de las ruedas.

Las presiones verticales máximas se encontraron en la zona de contacto neumático-suelo. Estas se propagan en profundidad. Para suelos arcillosos blandos TASC V3.0 establece un punto de estabilidad donde la respuesta del suelo es elástica cuando las presiones transmitidas son inferiores a 80 kPa. La compactación del suelo ocurre cuando la presión

TABLA 1. Datos de entrada de la maquinaria evaluada

Maquinaria	Eje	Medidas des neumático	Datos entrados a TASC V3.0					Presión de inflado del neumático (kPa)
			Neumático/ Estera Tipo	Estructura del neumático	Neumático/ Estera Ancho (m)	Diámetro del neumático/ Longitud de la estera (m)	Neumático/ Estera Carga (Mg)	
Tractor XTZ 150K-09	Front	21.3-24	d	ni	0.52	1.31	2.34	170
Tractor XTZ 150K-09	Rear	21.3-24	d	ni	0.52	1.31	2.12	170
Tractor YTO 1604	Front	460/85R34	r	no	0.48	1.66	1.97	130
Tractor YTO 1604	Rear	18.4-38	d	no	0.47	1.77	2.85	280
Remolque basculante 7CX (SC)-10	Front	600/50-22.5	d	tr	0.60	1.17	4.04	290
Remolque basculante 7CX (SC)-10	Rear	600/50-22.5	d	tr	0.60	1.17	3.19	290
CASE IH 8800		Track	ra		0.46	2.96	9.15	
Legenda	d - neumático diagonal; r - neumático radial tire; ra - estera; ni - neumático de bajo perfil, height/width 0.6<X<0.8; no - neumático de perfil normal height/width X≥0.8; tr - neumático terra height/width 0.6≤X							

TABLA 2. Resultados de la presión media en el contacto, compactación severa del suelo hasta la profundidad de y máximos esfuerzos verticales o máxima presión vertical transmitida

Maquinaria	Eje	Dimensiones del neumático	Resultados TASC V3.0		
			Presión media en el contacto (kPa)	Riesgo de compactación severa a la profundidad de. (m)	Maxima presión vertical (kPa)
Tractor XTZ 150K-09	Delantero	21.3-24	103	0.24	179
Tractor XTZ 150K-09	Trasero	21.3-24	98	0.23	170
Tractor YTO 1604	Delantero	460/85R34	75	0.19	130
Tractor YTO 1604	Trasero	18.4-38	166	0.31	288
Remolque basculante 7CX (SC)-10	Delantero	600/50-22.5	197	0.37	342
Remolque basculante 7CX (SC)-10	Trasero	600/50-22.5	196	0.32	340
CASE IH 8800	Esteras	Esteras	42	0	72

transmitida al suelo excede la fuerza de reacción correspondiente del suelo representada aquí por el punto de estabilidad, que puede ser la presión precompresión. No se produce una compactación severa del suelo si las presiones verticales causadas por la maquinaria son inferiores a la presión de precompresión o al punto de estabilidad (Guimarães Júnnyor *et al.*, 2019). Las Figuras 1 y 2 muestran la transmisión de presiones al suelo y los bulbos de presión para el tractor XTZ 150K-0.9. Se encuentran presiones superiores a 80 kPa hasta una profundidad de 0,24 y 0,23 m para los neumáticos delanteros y traseros respectivamente, por lo que existe un riesgo severo de compactación del suelo hasta estas profundidades. A partir de estas profundidades no se produce compactación del suelo.

La Figura 2 muestra los bulbos de presión del neumático trasero del tractor XTZ 150K-09. El suelo tiene una respuesta similar para los neumáticos delanteros y traseros de este tractor debido a que el tamaño de los neumáticos es el mismo en ambos ejes y la carga de los neumáticos es bastante similar. Las presiones máximas se obtuvieron en la superficie del suelo, alcanzando 179 y 170 kPa. La compactación del suelo se produce hasta 0,24 m para la llanta delantera y hasta 0,23 m para la llanta trasera, casi en la zona de máxima profundidad de labranza.

El tractor YTO 1604 muestra una diferencia en la respuesta del suelo para el neumático delantero y trasero. Aunque el tamaño de los neumáticos es

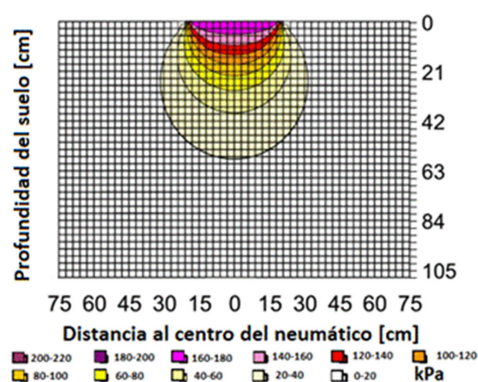


FIGURA 2. Bulbos de presión en el suelo bajo el neumático trasero del tractor XTZ 150K-09.

algo similar, la diferencia la marca la carga del neumático, siendo casi 1 Mg más en el neumático trasero respecto al delantero. Esto hace que la presión media de contacto del neumático trasero (288 kPa) sea casi el doble respecto a la del neumático delantero (130 kPa) (Tabla 2). La Figura 3 muestra las presiones de compresión en el suelo debajo del tractor YTO 1604 y CASE IH 8800. Tanto la cosechadora como el neumático delantero del tractor no causan compactación del suelo agrícola, debajo de la capa de máxima labranza. Incluso en la superficie del suelo, la cosechadora no provoca compactación. La llanta delantera provoca compactación hasta una profundidad de 0.19 m (Tabla 2), es decir, en la capa

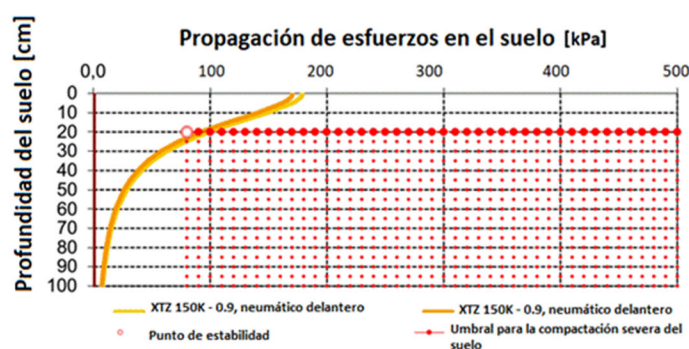


FIGURA 1. Propagación de presiones en el suelo para el tractor XTZ 150K-0.9.

de labranza. Sin embargo, el neumático trasero del YTO 1604 provoca la compactación del suelo hasta una profundidad de 0,31 m.

La **Figura 4** muestra los bulbos de presión en el suelo debajo de los neumáticos delanteros y traseros del YTO 1604. Para los bulbos de los neumáticos delanteros, la presión superior al punto de estabilidad solo ocurre en la capa superficial. Para el neumático trasero se observa una alta presión superior a 100 kPa en toda la capa de labranza, elevando el riesgo de compactación severa del suelo hasta los 0,31 m de profundidad.

La **Figura 5** muestra los bulbos de presión causados por el remolque basculante, aquí se observa la alta presión en el contacto suelo-neumático. Las presiones medias de contacto son similares, 197 y 196 kPa y las presiones verticales máximas también son similares, 342 y 340 kPa respectivamente. Sin embargo, el riesgo de compactación severa del suelo fue de

0,37 y 0,32 m, 5 centímetros más en el neumático delantero respecto al trasero. Aunque la presión en el contacto suelo-neumático es similar, la profundidad a la que se produce una compactación severa es mucho mayor en el caso del neumático delantero porque aplica una carga mayor sobre el suelo, de 850 kg. La representación de los bulbos de presión muestra que las presiones no sólo se propagan en profundidad por debajo del centro del neumático, sino que también se propagan en los lados con respecto al eje de la rueda, es decir, perpendicularmente a la dirección de progresión. Esto ocurre precisamente porque la presión ejercida sobre el suelo desplaza las partículas hacia las capas más profundas, pero al mismo tiempo lo hace hacia los lados, produciéndose una compactación lateral que, si bien no es tan severa como la que se produce en las capas inferiores, sí afecta las propiedades físicas del suelo.

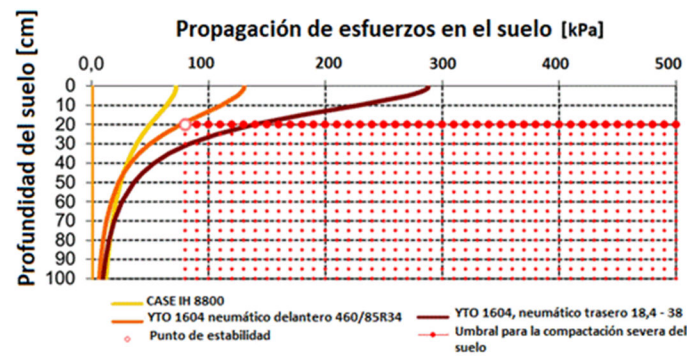


FIGURA 3. Propagación de presiones en el suelo para el tractor YTO 1604 y cosechadora CASE IH 8800.

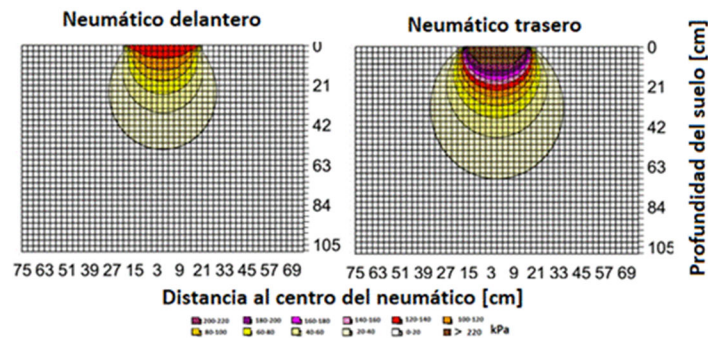


FIGURA 4. Bulbos de presión en el suelo bajo neumáticos del tractor YTO 1604.

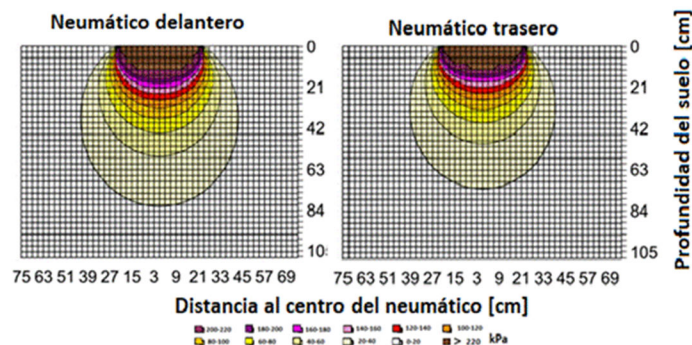


FIGURA 5. Bulbos de presión en el suelo bajo neumáticos del remolque basculante.

Al analizar estos resultados encontramos que tanto la cosechadora, el tractor XTZ 150K-09 como la rueda delantera del tractor YTO 1604 compactan únicamente la capa de labranza del suelo. En cultivos de temporada esta compactación no afecta al cultivo porque el suelo se labra al final de la cosecha. Sin embargo, en el caso de la caña de azúcar esto no sucede, y esta capa de suelo deberá ser descompactada con trabajos de cultivo profundo o descompactación entre hileras, realizando trabajos que demandan una gran cantidad de energía del tractor. A partir de estos resultados se puede proponer la descompactación hasta una profundidad de 0,37 m. Hasta esta profundidad se produce una fuerte compactación del suelo.

El alto potencial de que el remolque basculante y el neumático trasero del YTO 1604 causen compactación del suelo está relacionado con la alta carga que soportan las ruedas, lo que hace que las presiones aplicadas al suelo se extiendan más profundamente en el perfil vertical. Algunas investigaciones han descrito que la propagación de la presión del suelo a capas de mayor profundidad se debe principalmente a la carga por eje (González *et al.*, 2016, Botta *et al.*, 2002).

Los resultados obtenidos aquí también son consistentes con los de Botta *et al.* (2002), quienes describen que la presión en la zona de contacto rueda-suelo puede influir en la compactación de la superficie, mientras que a una profundidad igual o mayor a 40 cm, el peso sobre el eje, independientemente de la presión sobre el suelo, es la principal causa del proceso de compactación y Hakansson and Reeder (1994), quienes encontraron una fuerte y directa dependencia de la compactación de la superficie con la presión en el área de contacto rueda-suelo.

De los equipos evaluados, el remolque basculante es el que provoca la compactación del suelo a mayor profundidad y el que representa mayor riesgo de compactación severa del suelo. Una solución a la compactación del suelo provocada por este medio podría ser utilizarlo hasta una carga media, lo que reduciría la compactación. Sin embargo, la mejor variante sería utilizarlo sólo en suelos firmes o secos y sustituirlo por un remolque con menor capacidad de carga y menor peso total sobre los ejes durante la cosecha con alto contenido de humedad.

CONCLUSIONES

El uso del modelo TASC V3.0 permitió predecir la compactación del suelo causada por cosechadoras y equipos de transporte durante la cosecha de caña de azúcar en suelos arcillosos blandos. Se obtuvo una compactación del suelo más severa durante el uso del remolque basculante 7CX (SC)-10 debido a la alta presión media de contacto y la alta carga de los neumáticos, lo que provocó una compactación severa

del suelo que alcanzó los 0,37 m de profundidad. El neumático trasero del tractor YTO 1604 provocó una fuerte compactación del suelo hasta una profundidad de 0,31 m. En sentido general todos los equipos provocaron una severa compactación del suelo en la capa de labranza, por lo que se deben realizar trabajos de descompactación hasta una profundidad de 0.37 m, con el objetivo de aflojar el suelo en profundidad para un buen desarrollo de los retoños de caña de azúcar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAKUKKU, L., WEISSKOPF, P., CHAMEN, W.C.T., TIJINK, F.G.J., VAN DER LINDEN, J.P., PIRES, S., SOMMER, C. & SPOOR, G. 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part 1. Machine/soil interactions. *Soil Till. Res.*, 73, 145-160.
- ARVIDSSON, J. & KELLER, T. 2007. Soil stress as affected by wheel load and tyre inflation pressure. *Soil Till. Res.*, 96, 284-291.
- ASAE/ASABE S526.4(R2019) 2015. Soil and Water Terminology. St. Joseph, Michigan: ASABE.
- BAI, Z.G., DENT, D.L., OLSSON, L. & SCHAEPMAN, M.E. 2008. Global assessment of land degradation and improvement 1: Identification by remote sensing. *In*: FAO/ISRIC (ed.). Rome/Wageningen. : FAO/ISRIC.
- BATTIATO, A. & DISERENS, E. 2017. Tractor traction performance simulation on differently textured soils and validation: A basic study to make traction and energy requirements accessible to the practice. *Soil and Tillage Research*, 166, 18-32.
- BERLI, M., CASINI, F., ATTINGER, W., SCHULIN, R., SPRINGMAN, S.M. & KIRBY, J.M. 2015. Compressibility of Undisturbed Silt Loam Soil—Measurements and Simulations. *Vadose Zone J.*
- BIRIS, S.S., UNGUREANU, N. & CUJBESCU, D. 2019. Modelling of soil compaction under heavy-duty tractors. *INMATEH - Agr. Eng.*, 57, 261-270.
- BIRIS, S. S., VLADUT, V., UNGUREANU, N., PARASCHIV, G. & VOICU, G. 2009. Development and experimental testing of a FEM model for the stress distribution analysis in agricultural soil due to artificial compaction. *Agric. Conspec. Sci.*, 74, 21-29.
- BOTTA, G., JORAJURIA, D. & JORAJURIA, L.M. 2002. Influence of the axle load, tyre size and configuration on the compaction of a freshly tilled clayey soil. *J. Terramech.*, 39, 47-54.
- BOTTA, G.F., BECERRA, A.T. & TOURN, F.B. 2009. Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. *Soil Till. Res.*, 103, 381-386.

- BOTTA, G.F., TOLÓN-BECERRA, A., RIVERO, D., LAUREDA, D., RAMÍREZ-ROMAN, M., LASTRA-BRAVO, X., AGNES, D., FLORES-PARRA, I.M., PELIZZARI, F. & MARTIREN, V. (2016) Compactación produced by combine harvest traffic: Effect on soil and soybean (*Glycine max l.*) yields under direct sowing in Argentinean Pampas. *Eur. J. Agron.*, 74, 155-163.
- CHAMEN, W.C.T., MOXEY, A.P., TOWERS, W., BALANA, B. & HALLETT, P.D. (2015) Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. *Soil Till. Res.*, 146, 10-25.
- DE LIMA, R.P., DA SILVA, A.P., GIAROLA, N.F.B., DA SILVA, A.R., ROLIM, M.M. & KELLER, T. 2018. Impact of initial bulk density and matric suction on compressive properties of two Oxisols under no-till. *Soil and Tillage Research*, 175, 168-177.
- DÉFOSSEZ, P. & RICHARD, G. 2002. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. *Soil Till. Res.*, 67, 41-64.
- DISERENS, E. 2009. Calculating the contact area of trailer tyres in the field. *Soil & Tillage Research*, 103, 302-309.
- DISERENS, E., BATTIATO, A. & SARTORI, L. Soil Compaction, Soil Shearing and Fuel Consumption: TASC V3.0 – A Practical Tool for Decision-Making in Farming. International Conference of Agricultural Engineering, 6 - 10 July 2014 Zurich.
- DISERENS, E., CHANET, M. & MARIONNEAU, A. Machine Weight and Soil Compaction: TASC V2.0.xls – a Practical Tool for Decision-Making in Farming. AgEng, 6 - 8 september 2010 Clermont-Ferrand. Ref 239.
- DISERENS, E., DEFOSSEZ, P., DUBOISSET, A. & ALAOUI, A. 2011. Prediction of the contact area of agricultural traction tyres on firm soil. *Bios. Eng.*, 110, 73-82.
- GONZÁLEZ, O., IGLESIAS, C. E. & HERRERA, M. 2009. Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Rev. Cienc. Téc. Agrop.*, 18, 57-63.
- GONZÁLEZ, O., IGLESIAS, C. E., HERRERA, M., LÓPEZ, E. & SÁNCHEZ, A. 2008. Efecto de la humedad y la presión sobre el suelo en la porosidad total de un Rhodic Ferralsol. *Rev. Cienc. Téc. Agrop.*, 17, 50-54.
- GONZÁLEZ, O., IGLESIAS, C.E., LÓPEZ, E., RECAREY, C.A. & HERRERA, M. 2016. Modelling in FEM the soil pressures distribution caused by a tyre on a Rhodic Ferralsol soil. *J. of Terramech.*, 63, 61-67.
- GONZÁLEZ, O., IGLESIAS, C.E., RECAREY, C.A., URRIOLAGOITIA-SOSA, G., URRIOLAGOITIA-CALDERÓN, G., HERNÁNDEZ, L.H. & HERRERA, M. 2013. Three dimensional finite element model of soil compaction caused by agricultural tire traffic. *Comput. Electron. Agric.*, 99, 146-152.
- GUIMARÃES JÚNNYOR, W.D.S., DISERENS, E., DE MARIA, I.C., ARAUJO-JUNIOR, C.F., FARHATE, C.V.V. & DE SOUZA, Z.M. 2019. Prediction of soil stresses and compaction due to agricultural machines in sugarcane cultivation systems with and without crop rotation. *Sci. Total Environ.*, 681, 424-434.
- GUIMARÃES, R.M.L., KELLER, T., MUNKHOLM, L.J. & LAMANDÉ, M. 2017. Visual soil evaluation and soil compaction research. *Soil Till. Res.*, 173, 1-3.
- HAKANSSON, I. & REEDER, R.C. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load extent, persistence and crop response *Soil Till. Res.*, 29, 277-304.
- HAMZA, M.A. & ANDERSON, W.K. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.*, 82, 121-145.
- HERNÁNDEZ, A., PÉREZ, J.M., BOSCH, D. & CASTRO, N. 2015. *Clasificación de los suelos de Cuba 2015*, San José de las Lajas, Cuba, Ediciones INCA.
- KELLER, T. 2005. A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. *Biosystems Engineering*, 92, 85-96.
- KELLER, T., DA SILVA, A.P., TORMENA, C.A., GIAROLA, N.F. B., CAVALIERI, K.M.V., STETTLER, M. & ARVIDSSON, J. 2015. SoilFlex-LLWR: linking a soil compaction model with the least limiting water range concept. *Soil Use Manage.*, 31, 321–329.
- KELLER, T., DÉFOSSEZ, P., WEISSKOPF, P., ARVIDSSON, J. & RICHARD, G. 2007. SoilFlex: A model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. *Soil Till. Res.*, 93, 391-411.
- KELLER, T. & LAMANDÉ, M. 2010. Challenges in the development of analytical soil compaction models. *Soil Till. Res.*, 111, 54-64.
- KUHWALD, M., DÖRNHÖFER, K., OPPELT, N. & DUTTMANN, R. 2018. Spatially Explicit Soil Compaction Risk Assessment of Arable Soils at Regional Scale: The SaSCiA-Model. *Sustainability*, 10.
- LÓPEZ-BRAVO, E., SAUCEDO-LEVI, E.R., GONZÁLEZ-CUETO, O., HERRERA-SUÁREZ, M. & BETANCOURT-RODRÍGUEZ, Y. 2022.

- Effects of mechanized harvesting of sugarcane over the soil. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 31, 5-12.
- MARTÍNEZ-RAMÍREZ, R., GONZÁLEZ-CUETO, O., BETANCOURT-RODRÍGUEZ, Y., RODRÍGUEZ-OROZCO, M. & GUILLÉN-SOSA, S. 2017. Soil compaction and variation of bank profile provoked by the harvester CASE IH A8800 on wet soils. *Rev. Ing. Agr.*, 7, 30-35.
- NAWAZ, M., BOURRIÉ, G. & TROLARD, F. 2013. Soil compaction impact and modelling. A review. *Agron. Sustain. Dev.*, 33, 291-309.
- ONEI 2023. *Anuario Estadístico de Cuba 2022. Edición 2023*, La Habana, Oficina Nacional de Estadísticas e Información.
- SCHJØNNING, P., LAMANDÉ, M., TØGERSEN, F.A., ARVIDSSON, J. & KELLER, T. 2008. Modelling effects of tyre inflation pressure on the stress distribution near the soil–tyre interface. *Biosyst. Eng.*, 99, 119-133.
- SCHJØNNING, P., VAN DEN AKKER, J.J.H., KELLER, T., GREVE, M.H., LAMANDÉ, M., SIMOJOKI, A., STETTLER, M., ARVIDSSON, J. & BREUNING-MADSEN, H. 2015. Chapter Five - Driver-Pressure-State-Impact-Response (DPSIR) Analysis and Risk Assessment for Soil Compaction—A European Perspective. In: SPARKS, D.L. (ed.) *Advances in Agronomy*. Academic Press.
- SILVA, R.P., ROLIM, M.M., GOMES, I.F., PEDROSA, E.M.R., TAVARES, U.E. & SANTOS, A.N. 2018. Numerical modeling of soil compaction in a sugarcane crop using the finite element method. *Soil Till. Res.*, 181, 1-10.
- STETTLER, M., KELLER, T., WEISSKOPF, P., LAMANDÉ, M., LASSEN, P. & SCHJØNNING, P. 2014. Terranimo – a web-based tool for evaluating soil compaction. *Landtechnik*, 69, 132-137.
- STOESSEL, F., SONDEREGGER, T., BAYER, P. & HELLWEG, S. 2018. Assessing the environmental impacts of soil compaction in Life Cycle Assessment. *Sci. Total Environ.*, 630, 913-921.
- VAN DEN AKKER, J.J.H. 2004. SOCOMO: a soil compaction model to calculate soil stresses and the subsoil carrying capacity. *Soil Till. Res.*, 79, 113-127.

Omar González-Cueto. Dr. y Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Cuba.

Elvis López-Bravo, Dr. y Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Cuba, elvislb@uclv.edu.cu.

Yoel Betancourt-Rodríguez, Dr. y Profesor Titular, Departamento de Ingeniería Agrícola, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas. Investigador Titular, Instituto de Investigaciones de la Caña de Azúcar, INICA Cuba, richardc358@gmail.com.

Richard Xavier Cevallos-Mera, MSc y Profesor Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador, gmerlan@gmc.gms.minem.gub.gv.

Miguel Herrera-Suárez, Dr. y Profesor Titular, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Universidad Técnica de Manabí, Portoviejo, Ecuador, miguelhs2000@yahoo.com.