

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN EN UN VERTISOL CON CAÑA DE AZÚCAR BAJO DIFERENTES PRÁCTICAS DE MANEJO

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL RESISTANCE PENETRATION ON A VERTISOL WITH SUGARCANE UNDER DIFFERENT MANAGEMENT PRACTICES

Juan Alejandro Villazón Gómez^{1*}, George Martín Gutiérrez² y Yakelín Cobo Vidal³

¹ Universidad de Holguín, Sede José de La Luz y Caballero, Facultad de Ciencias Naturales y Agropecuarias (FACCINA), Departamento de Ciencias Agropecuarias. Ave. de Los Libertadores, km 3½, no. 287. Holguín, Cuba

<https://orcid.org/0000-0002-2436-0591>

² Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (EPICA), Departamento de Investigación e Innovación Tecnológica. Guaro S/N, Mayarí, Holguín, Cuba

<https://orcid.org/0000-0003-4631-3013>

³ Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (EPICA), Departamento de Investigación e Innovación Tecnológica. Guaro S/N, Mayarí, Holguín, Cuba

<https://orcid.org/0000-0002-9377-2397>

* Autor para correspondencia. E-mail: villazon1975@gmail.com

RESUMEN

La compactación afecta al cultivo de la caña de azúcar. El objetivo de este trabajo fue analizar la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración en un Vertisol Pélico plantado con caña de azúcar bajo diferentes prácticas de manejo. El estudio se realizó en áreas de la Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Holguín, Mayarí, Provincia Holguín, Cuba. La cosecha se realizó a la cepa caña planta de la variedad C8612, usando una combinada cañera KTP-2M sobre neumáticos, con un camión KAMAZ. Se utilizó un diseño experimental de parcela dividida, con 3 tratamientos, 4 subtratamientos y 4 repeticiones. Los tratamientos fueron: quema de residuos de cosecha (A), eliminación de residuos de cosecha (B), y conservación de residuos de cosecha (C). Para la determinación de la resistencia a la penetración se utilizó un penetrómetro de impacto IAA/Planalsucar-Stolf. Los resultados fueron expresados en intervalos constantes (5 cm), hasta los 30 cm de profundidad. Se determinaron las semivarianzas en función de la distancia; se realizó el ajuste de los semivariogramas experimentales mediante los modelos teóricos adecuados y se verificó el grado de dependencia espacial. La resistencia a la penetración aumentó hasta la capa de 15-20 cm, donde alcanzó 11,133 MPa, disminuyendo hasta 8,401 MPa en la profundidad de 25-30 cm. La mayor resistencia a la penetración se encontró en los tratamientos A y B. Sin embargo, las capas más compactadas aparecieron a menor profundidad en A (10-20 cm), con respecto a B (15-30 cm), particularmente hacia las zonas donde no se aplicó fertilizante orgánico o no se fertilizó. La menor resistencia a la penetración se encontró en el tratamiento C.

Palabras clave: Compactación de suelos, residuos de cosecha, fertilización.

ABSTRACT

Compaction affects the cultivation of sugarcane. The objective of this work was to analyze the spatial variability of resistance to penetration in a Pelic Vertisol planted with sugar cane under different management practices. The study was conducted in areas of the Provincial Sugar Cane Research Station of Holguín, Mayarí, Holguin Province, Cuba. The harvest was carried out with the cane plant variety C8612, using a KTP-2M combine cane harvester on tires, with a KAMAZ truck. A split plot experimental design was used, with 3 treatments, 4 sub-treatments and 4 repetitions. The treatments were: crop residue burning (A), crop residue disposal (B), and crop residue conservation (C). An IAA/Planalsucar-Stolf impact penetrometer was used to determine the penetration resistance. The results were expressed in constant intervals (5 cm) up to 30 cm depth. The semivariograms were determined as a function of distance; the adjustment of the experimental semivariograms was carried out using the appropriate theoretical models, and the degree of spatial dependence was verified. Soil penetration resistance increased up to the 15-20 cm layer, where it reached 11,133 MPa, decreasing to 8,401 MPa at a depth of 25-30 cm. The greatest resistance to penetration was found in treatments A and B. However, the most compacted layers appeared at a lower depth (10-20 cm) in A, compared to B (15-30 cm), particularly towards areas where organic fertilizer was not applied or not fertilized. The lowest penetration resistance was found in treatment C.

Keywords: Soil compaction, harvest residues, fertilization.

INTRODUCCIÓN

El uso y manejo de la tierra tiene un reconocido impacto en el ciclo del carbono y el nitrógeno (Luca et al., 2018). El carbono orgánico es el principal encargado de la calidad del suelo, al jugar un importante rol en el mantenimiento de sus propiedades químicas, físicas y biológicas (Bindraban et al., 2015; Dhaliwal et al., 2019). Sin embargo, las labores agrícolas alteran el estado físico del suelo, al provocar cambios en la densidad aparente, la porosidad, en la distribución del volumen de poros según su diámetro y en la retención de agua; lo que influye sobre el adecuado desarrollo de las plantas (Souza et al., 2023). La mecanización intensiva de las labores agrícolas que se le realizan al cultivo de la caña de azúcar afectan la calidad física de los agroecosistemas (Cherubin et al., 2016). Además, el número de cosechas a través de sucesivas siembras se ha convertido en un reto para el mantenimiento de la calidad del suelo (Cavalcanti et al., 2019).

En la superficie de los suelos plantados con caña de azúcar, la compactación y el contenido de carbono orgánico están muy influenciados por las labores de cosecha del cultivo, al incrementarse a medida que aumenta el número de retoños de la cepa. El incremento, con las sucesivas cosechas, del carbono orgánico del suelo provoca la disminución de la densidad aparente máxima y aumenta el contenido óptimo de agua en el suelo. En los horizontes inferiores, donde los sistemas de labranza convencional forman "pisos de arado" inmediatamente por debajo de las capas de laboreo, el incremento del carbono orgánico

mejora las condiciones físicas del suelo, pero el grado de compactación puede incrementarse ligeramente por la frecuencia del tráfico de la maquinaria agrícola en el campo, causada por el número de cosechas (Cavalcanti et al., 2019).

La habilidad de las raíces para desarrollarse y explorar el suelo en busca de agua y nutrientes influye sobre el desarrollo vegetativo de las plantas (Clark et al., 2003). El crecimiento radicular y, por ende, el rendimiento de los cultivos son afectados por la compactación del suelo (Rasche et al., 2020). El mismo, ante la impedancia mecánica del suelo, experimenta una disminución de la tasa de crecimiento debido al esfuerzo que realiza para desplazar las partículas del suelo durante su elongación. A medida que aumenta la resistencia del suelo, la tasa de elongación de las raíces disminuye, debido a la creciente resistencia de las partículas del suelo al desplazamiento, con restricciones para el acceso al agua y a los nutrientes y, por tanto, disminuir el rendimiento de los cultivos (Clark et al., 2003).

De esta manera, la degradación de las propiedades físicas de los suelos, debido a la compactación que resulta del tráfico continuado de la maquinaria agrícola, es el principal efecto negativo de la mecanización de las labores agrícolas (Esteban et al., 2020). Los cambios en la calidad física de los suelos, tradicionalmente se cuantifican mediante atributos físicos tales como la densidad aparente, la porosidad del suelo, la resistencia a la penetración y la distribución de los agregados según su tamaño (Cherubin et al., 2016). En el caso de la resistencia a la penetración, la misma, ha sido utilizada constantemente para determinar el estado físico de los suelos cañeros

(Rodríguez et al., 2012; Barbosa et al., 2018; Esteban et al., 2019; Cavalcanti et al., 2020).

Se recomienda que, para retrasar o atenuar el proceso de compactación de los suelos, se utilice una combinación de prácticas agronómicas, como pueden ser la labranza mínima (y cero), tráfico controlado, la combinación de labores agrícolas para minimizar el número de pases, atenuar la intensidad del pastoreo y la carga animal, conservar la cobertura vegetal del suelo, aflojar el suelo compactado mediante un laboreo profundo acompañado de un agente floculante como el yeso para ralentizar la recompactación, y utilizar una rotación de cultivos con plantas con un sistema radicular profundo y poderoso para atravesar capas de suelo relativamente compactadas. La maquinaria debe ser con cargas bajas por eje y neumáticos con una gran superficie de contacto (Hamza y Anderson, 2005).

También es importante el incremento del contenido de materia orgánica en el suelo mediante restos de cosecha (Hamza y Anderson, 2005; Cherubin et al., 2021), abonos verdes o la fertilización con materia orgánica de origen animal o vegetal, que no solo disminuyen la densidad aparente del suelo (Hamza y Anderson, 2005), sino que también actúan como un colchón amortiguador que disminuye la presión directa sobre el suelo de la maquinaria agrícola (Hamza y Anderson, 2005; Holthusen et al., 2018). Por último, las actividades agrícolas deben realizarse con una humedad mínima indispensable (Hamza y Anderson, 2005).

La aplicación de abonos orgánicos, principalmente estiércoles, repercute de manera favorable en el rendimiento, y siempre han sido una alternativa de abonado para los agricultores cuando sube el precio de los fertilizantes químicos. Además, siguen siendo importantes en el uso y la sostenibilidad del recurso suelo bajo las condiciones en que se practica la agricultura tradicional (Trinidad y Velasco, 2016). Por otro lado, las aplicaciones de cachaza, sola o mezclada con zeolita y caliza fosfatada, incrementan la calidad del suelo; lo que conlleva a un mejor desarrollo vegetativo de la caña de azúcar y por ende, a un incremento de los rendimientos agrícolas (Díaz et al., 2010).

Estas aplicaciones en el cultivo de la caña de azúcar, tienen un efecto positivo sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo y mejoran, sobre todo, su calidad en relación con la estructura, infiltración y retención de agua; estimula la formación de agregados, el reciclaje de macronutrientes, el desarrollo radical y la actividad microbiológica. Los mejores resultados se obtienen mezclando la cachaza con otros abonos orgánicos o con fertilizantes

(Quiroz y Pérez, 2013).

Con la adopción de tecnologías propias de la agricultura de precisión, ha aumentado el interés en el manejo de la variabilidad espacial como método para una mejor caracterización de los suelos (Bosch et al., 2012), a través del estudio de sus propiedades (Miqueloni et al. 2015; Souza et al., 2016; Carvalho et al., 2017; Araújo et al., 2018; Santos et al., 2018; Leiva et al., 2019; Siqueira et al., 2019; Sun et al., 2021; Silva et al., 2022) y del rendimiento de los cultivos (Castañeda et al., 2014; Santos et al., 2017; Souza et al., 2023).

La misma resulta esencial para el manejo específico de la fertilidad del suelo en los campos de caña de azúcar. Sin embargo, la complejidad del sistema de cultivo, las limitaciones en el manejo de datos, la disponibilidad de equipos adecuados y la falta de sistemas apropiados de apoyo a las decisiones limitan la adopción de la AP por parte de la industria de la caña de azúcar (Sanches et al., 2021).

Por las razones antes expuestas, el objetivo de este trabajo fue analizar la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración en un Vertisol Pélico, plantado con caña de azúcar bajo diferentes manejos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en un experimento plantado con caña de azúcar sobre un Vertisol Pélico (Hernández et al., 2015), clasificado, desde el punto de vista textural como arcilloso, y ubicado en áreas del Bloque Experimental de Cristino Naranjo, perteneciente a la Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (EPICA) de Holguín, Mayarí, Provincia Holguín, Cuba. La cosecha se realizó, a la cepa caña planta de la variedad C8612, con una combinada cañera KTP-2M sobre neumáticos, con un camión KAMAZ. Los muestreos se realizaron, después del manejo de los residuos de cosecha correspondiente en cada caso.

Se utilizó un diseño experimental de parcela dividida (experimento OCCN3), con 3 tratamientos, 4 subtratamientos y 4 repeticiones. Los tratamientos y subtratamientos, fertilizados con una misma dosis de fondo (50 kg ha^{-1} de P_2O_5 y 120 kg ha^{-1} de K_2O), se describen en la Tabla 1.

Con un total de 48 parcelas de $4,80 \times 7,50 \text{ m}$, con 4 surcos cada una, y una distancia entre surcos de $1,60 \text{ m}$, se escogió como sitio de muestreo el espacio entre el segundo y el tercer surco; hacia el centro de cada parcela de 36 m^2 . Las determinaciones se realizaron con el suelo a capacidad de campo, de forma tal que, al prescindir del efecto de la humedad, la resistencia a la penetración se debe solo a los efectos de la

Tabla 1. Conformación de los tratamientos y subtratamientos.**Table 1. Composition of treatments and subtreatments.**

Subtratamientos	Tratamientos		
	A (Quema de residuos de cosecha)	B (Eliminación de residuos de cosecha)	C (Conservación de residuos de cosecha)
I	Fertilización orgánica (30 t ha ⁻¹ de cachaza)		
II	Fertilización orgánico-mineral (18 t ha ⁻¹ de cachaza + 100 kg ha ⁻¹ de nitrógeno)		
III	Fertilización mineral (100 kg ha ⁻¹ de nitrógeno)		
IV	Sin fertilizar (Solo dosis de fondo)		

compactación (Sellés et al., 2012).

Para la determinación de la resistencia a la penetración se utilizó un penetrómetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf (Stolf et al., 1983), con la masa impactadora de 4 kg regulada a una altura de 0,40 m. La transformación de la cantidad de impactos por dm a megapascales (MPa) se realizó a través de la expresión matemática planteada por Stolf (1991):

$$RP(\text{MPa}) = 0,547 + 0,675 * N \quad (1)$$

Donde RP es resistencia a la penetración y N es la cantidad de impactos por dm.

Estos resultados fueron expresados en intervalos constantes (5 cm), hasta los 30 cm de profundidad.

Se determinaron las semivarianzas en función de la distancia y se realizó el ajuste de los semivariogramas experimentales mediante los modelos teóricos adecuados. El semivariograma experimental $\gamma(h)$ utilizado fue:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2Np(h)} \sum_{i=1}^{Np(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (2)$$

Donde $Np(h)$ es el número de pares de observaciones comparadas en cada distancia, $Z(x_i)$ es el valor de la variable en el sitio x_i y $Z(x_i + h)$ es el valor de la variable en un sitio ubicado a una distancia h del sitio x_i .

Una vez establecidos los modelos teóricos, se verificó el grado de dependencia espacial mediante los índices siguientes (Cambardella et al., 1994):

$$GD(\%) = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) * 100 \quad (3)$$

Donde GD es el grado de dependencia, C_0 es el

efecto pepita y C_1 es la variabilidad estructural. El grado de dependencia tiene la siguiente clasificación: *fuerte* dependencia espacial ($GD \leq 25\%$), *moderada* dependencia espacial ($25 < GD \leq 75\%$) y *débil* dependencia espacial ($GD > 75\%$) (Biondi et al., 1994).

$$IDE(\%) = \left(\frac{C_1}{C_0 + C_1} \right) * 100 \quad (4)$$

Donde IDE es el índice de dependencia espacial, C_1 es la variabilidad estructural y C_0 es el efecto pepita. De acuerdo a la clasificación propuesta para el GD por Cambardella et al. (1994), Seidel y Oliveira (2016) plantean para el IDE de Biondi et al. (1994) las siguientes categorías: *fuerte* dependencia espacial ($IDE > 75\%$), *moderada* dependencia espacial ($25 < IDE \leq 75\%$) y *débil* dependencia espacial ($IDE \leq 25\%$).

Para el análisis exploratorio de los datos se utilizó el software Statistica 8. Los semivariogramas y el krigeaje se realizaron mediante el Surfer 8.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2 muestra el comportamiento de los estadígrafos de posición, dispersión y de forma de la resistencia a la penetración en cada una de las profundidades estudiadas. Puede apreciarse, mediante las medias, un incremento constante de la resistencia a la penetración hasta la profundidad de 15-20 cm, capa en la que la resistencia a la penetración alcanza su máximo valor (11,133 MPa, media). Por debajo de esta profundidad, la resistencia a la penetración desciende hasta 8,462 MPa (profundidad de 20-25 cm) y 8,402 MPa (profundidad de 25-30 cm). Los valores de estas dos últimas profundidades estuvieron por debajo de la resistencia a la penetración encontrada en la capa de 10-15 cm.

La mayor lejanía entre la media y la mediana

Tabla 2. Análisis exploratorio de datos de resistencia a la penetración antes y después de la cosecha mecanizada en un Vertisol Pélico plantado con caña de azúcar.**Table 2. Exploratory analysis of penetration resistance data before and after mechanical harvesting in a Pelic Vertisol planted with sugarcane.**

Prof. (cm)			Error		Desv.	C. V.	Asimetría	Curtosis
	Media	Mediana	estándar	Varianza	estándar	(%)		
0-5	3,276	3,440	0,080	0,310	0,556	16,98	0,225	-0,119
5-10	5,791	5,272	0,318	4,860	2,204	38,07	0,523	-0,383
10-15	9,961	8,650	0,415	8,251	2,873	28,84	0,877	0,645
15-20	11,133	10,672	0,421	8,522	2,919	26,22	0,590	-0,233
20-25	8,462	7,972	0,290	4,025	2,006	23,71	0,788	0,018
25-30	8,401	8,422	0,322	4,988	2,233	26,58	0,768	1,516

Prof.: Profundidad; Desv. estándar: Desviación estándar; C. V.: Coeficiente de variación.

se observó en la capa de 10-15 cm (media, 9,961 MPa; mediana, 8,650 MPa). La diferencia fue de 1,311 MPa; es en esta profundidad donde las observaciones extremas pueden provocar el desplazamiento de la media fuera del centro de la distribución normal de los datos.

García et al. (2020), al elaborar una metodología para el diagnóstico de la compactación determinaron, para la profundidad de 0-20 cm, los valores críticos de 23, 13 y 6 impactos por dm (5,272, 3,922 y 2,572 MPa, respectivamente); y para la profundidad de 20-30 cm, los valores críticos de 7, 5 y 3 impactos por dm (16,072, 9,322 y 4,597 MPa, respectivamente). En cada profundidad, estos valores se corresponden con las categorías de humedad baja, media y alta en Gleysoles Vérticos plantados con caña de azúcar.

La varianza y la desviación estándar indican que entre los 10-20 cm existe una mayor dispersión de los valores de resistencia a la penetración observados con respecto a la media de la muestra. También el coeficiente de variación muestra que en estas capas y, sobre todo, en la profundidad de 5-10 cm existe una mayor dispersión de los datos alrededor de la media y que la probabilidad de encontrar un valor de resistencia a la penetración cercano a esta es mayor entre los 5-20 cm de profundidad.

En el caso de los estadígrafos de forma, los valores a partir del coeficiente de asimetría de Fisher, superiores a 0, indican que la deformación horizontal de los valores de la variable respecto al valor central de la media es asimétrica positiva a la derecha; mientras que los valores de la curtosis señalan que la distribución de los valores de resistencia a la penetración es más apuntada que la distribución normal (curtosis leptocúrtica) en las profundidades de 10-15, 20-25 y 25-30 cm; mientras que es platicúrtica en las profundidades de 0-5, 5-10 y 15-20 cm.

La Fig. 1 muestra los semivariogramas

obtenidos al realizar el ajuste de los modelos experimentales mediante el modelo teórico correspondiente. En los 6 casos la resistencia a la penetración mostró una adecuada estructura espacial, lo que se puede apreciar, según Acevedo et al. (2015), por la manera clara en la que se incrementan los valores de la semivarianza.

La Tabla 3 muestra los valores del efecto pepita, de la meseta y el alcance que se obtuvieron al ajustar los semivariogramas experimentales mediante los modelos teóricos adecuados; así como los índices de dependencia espacial. Los semivariogramas experimentales fueron ajustados mediante modelos esféricos y exponenciales. Puede apreciarse que la semivarianza independiente de la distancia de muestreo (efecto pepita) se incrementa con la profundidad. Similar comportamiento, con respecto a la profundidad, se observa en la varianza (meseta), que va en aumento hasta la capa de 15-20 cm, para disminuir en las profundidades de 20-25 y de 25-30 cm.

La cercanía entre los valores de meseta y los de la varianza de los datos es similar en todas las profundidades, por lo que en todas las capas se cumple con el supuesto de estacionaridad. Puede observarse que los valores de meseta se hacen constantes a distancias (alcance) dispares entre sí, pues van desde 5,50 m en la capa de 10-15 cm hasta 39,50 m en la de 20-25 cm.

En el caso los índices de Cambardella (Cambardella et al., 1994) y Biondi (Biondi et al., 1994), se aprecia que el grado de dependencia espacial es *fuerte* para todas las capas, hasta los 20 cm de profundidad y *moderada* para las dos capa más profundas, según las clasificaciones propuestas por Cambardella et al. (1994) y Seidel y Olivera (2016), respectivamente.

La Fig. 2 muestra la distribución espacial de la resistencia a la penetración en el krigeaje el Vertisol Pélico plantado con caña de azúcar bajo

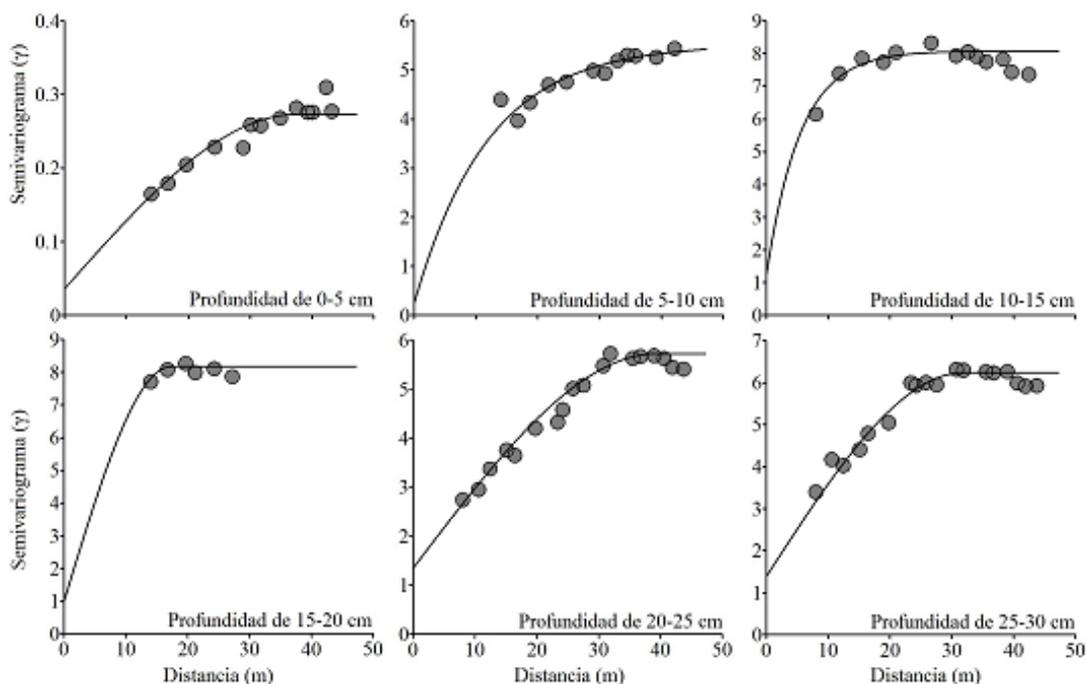


Fig. 1. Semivariogramas experimentales ajustados según los modelos teóricos correspondientes.
Fig. 1. Experimental semivariograms fitted according to the corresponding theoretical models.

Tabla 3. Parámetros de los modelos teóricos e índices de dependencia espacial.
Table 3. Parameters of the theoretical models and spatial dependence indices.

Prof. (cm)	Modelo	Efecto pepita			Alcance (m)	Dependencia espacial (%)	
		Meseta				Cambardella	Biondi
0-5	Esférico	0,036	0,237	37,50	15,19	84,81	
5-10	Exponencial	0,251	5,275	12,00	4,76	95,24	
10-15	Exponencial	1,250	6,840	5,50	18,27	81,73	
15-20	Esférico	1,000	7,170	17,25	13,95	86,05	
20-25	Esférico	1,350	4,375	39,50	30,86	69,14	
25-30	Esférico	1,390	4,850	32,00	28,66	71,34	

Prof.: Profundidad.

diferentes manejos de los residuos de cosecha y fertilización. En la profundidad de 0-5 cm se aprecia cierta homogeneidad en toda el área, con pocos cambios en los valores de resistencia a la penetración. El valor más alto (4,597 MPa) se localizó en dos esquinas opuestas, en la 4ta repetición del tratamiento A (Quema de residuos de cosecha), subtratamiento I (Fertilización orgánica) y en la 1ra repetición del tratamiento C (Conservación de residuos de cosecha), subtratamiento IV (Sin fertilización).

En la profundidad de 5-10 cm se observa, con

respecto a la capa sobreyacente, un incremento de la resistencia a la penetración en toda el área. Sobre todo, en la parte central y final del tratamiento A, final del tratamiento B (Eliminación de residuos de cosecha) y el centro del tratamiento C, con valores superiores a 6 MPa, e inclusive por encima de 9 MPa. La mayor resistencia a la penetración (11,347 MPa) se localizó cercana al inicio de los surcos en el subtratamiento II (Fertilización orgánico-mineral) del tratamiento B.

El aumento de la compactación es menos notable en una franja diagonal que comienza en

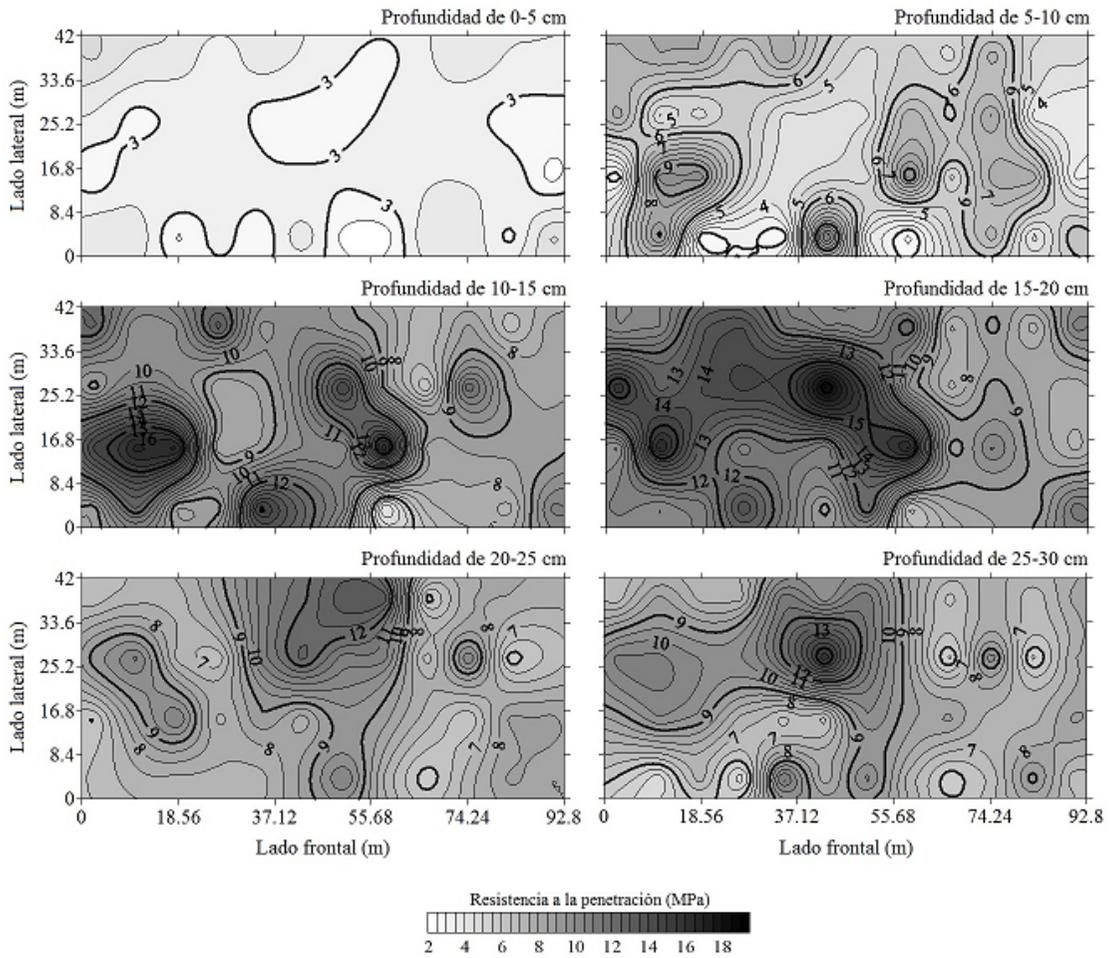


Fig. 2. Mapas de resistencia a la penetración en el experimento OCCN3 en cada profundidad.
Fig. 2. Penetration resistance maps in the OCCN3 experiment at each depth.

las cabezas de los surcos centrales del tratamiento A y termina al final de los surcos del tratamiento B que limitan con el tratamiento C. de la misma forma, se aprecia un menor incremento de la resistencia a la penetración en los surcos correspondientes al subtratamiento IV en el tratamiento C.

En la profundidad de 10-15 cm se observa que continúa el aumento de la resistencia a la penetración y que, en casi toda el área ocupada por los tratamientos A y B está alcanzó valores superiores a los 9 MPa, encontrándose, inclusive, zonas con una resistencia a la penetración superior a 12 y a 15 MPa; sobre toda en la franja ocupada por el tratamiento A. A todo lo largo del tratamiento C con fertilización orgánica, los valores de resistencia a la penetración fueron más bajos (Fig. 2).

En la profundidad de 15-20 cm continúan los altos valores de resistencia a la penetración (9

MPa) en los tratamientos antes mencionados, con una lengüeta que sobresale hacia el centro del tratamiento C y que se prolonga hacia arriba, por el subtratamiento II correspondiente, en forma de yunque, donde se mantuvo la cobertura de paja (tratamiento A) y se aplicó materia orgánica (cachaza) la resistencia a la penetración fue menor. En toda la parte central del tratamiento A, y hacia los límites superior e inferior con el tratamiento B, se encontraron valores de resistencia a la penetración por encima de 12 MPa. Este comportamiento de la compactación continúa manifestándose hacia el centro del tratamiento B en una franja dentro de la que, inclusive, se encontraron valores de resistencia a la penetración superiores a 15 MPa, con 18,772 MPa como valor extremo.

En la profundidad de 20-25 cm se observa una disminución de la resistencia a la penetración, menos notable en el tratamiento B, en el que casi

toda su superficie mostró una resistencia a la penetración por encima de 9 MPa; con más de 12 MPa hacia el centro-final del área correspondiente a dicho tratamiento. Valores por encima de 9 MPa se encontraron también hacia el centro del tratamiento A, aunque mucho más reducidos en cuanto a superficie.

En la profundidad de 25-30 cm se localizó, hacia el centro del tratamiento B, una pequeña área con una resistencia a la penetración de más de 15 MPa, que forma el centro de otra zona con más de 12 MPa de resistencia a la penetración a partir de la cual se extienden las zonas de mayor resistencia a la penetración (por encima de 9 MPa) en tres direcciones: hacia los extremos inicial y final del tratamiento B y a través de la parte central del tratamiento A, hacia su borde lateral externo.

De forma general, en estas dos últimas profundidades, en el área del tratamiento C, los valores de resistencia a la penetración estuvieron por debajo de los observados en los otros dos tratamientos.

Bajo los 10 cm de profundidad, solo aparecen elevados valores de resistencia a la penetración que indican que, aquí, la compactación puede ser un factor edáfico limitativo para el cultivo de la caña de azúcar, pues la resistencia a la penetración alcanza valores superiores a los 3 MPa, propuesto por Dexter (1986) como *RP* crítica para el crecimiento de las raíces de plantas monocotiledóneas.

Castioni et al. (2018), en un Eutrudox Ródico del estado de São Paulo, en el sur de Brasil, observaron que la eliminación de los residuos de cosecha provoca el deterioro de la calidad física del suelo y que, sobre todo, el impacto negativo sobre el suelo se acentúa ante la remoción total y las altas tasas de eliminación de restos de cosecha, por lo que recomiendan la remoción parcial, solo si fuera necesaria (e. g. para propósitos bioenergéticos) y dejar en el campo alrededor de 10 Mg ha⁻¹, para no afectar de forma significativa, entre otras, la calidad física de suelo.

Martínez et al. (2021), recomiendan la necesidad de utilizar cosechadoras cañeras con rodajes de alta flotación (ya sea con esteras o neumáticos); el corte simultáneo de un mayor número de hileras (de forma tal que algunas de estas queden sin recibir el peso de la máquina) mediante un mayor ancho de trabajo y la estandarización de la rodada mediante el uso de anchos de vías semejantes en los puentes, que deben ser ajustables a los marcos de plantación establecidos, con el fin de alejar el efecto de compactación del sistema radicular del cultivo. Además, incluir en todas las alternativas, un transporte intermedio con alta capacidad de tránsito para operar en el campo con condiciones

de sobrehumedecimiento y trasvasar la caña de azúcar cosechada fuera del área de siembra. Estos pueden ser autopropulsados o remolcados, con la utilización de uno o dos puentes, con neumáticos de alta flotación o con orugas de acero o de caucho y con capacidad de carga por debajo de 6 t.

CONCLUSIONES

Con el manejo de los residuos de cosecha y de la fertilización, la resistencia a la penetración aumentó gradualmente hasta la capa de 15-20 cm, donde alcanzó una media de 11,133 MPa; para disminuir hasta 8,401 MPa en la profundidad de 25-30 cm. La mayor dispersión de los datos se observó entre los 5 y los 15 cm.

La mayor resistencia a la penetración se encontró en los tratamientos A (Quema de residuos de cosecha) y B (Eliminación de residuos de cosecha); con la diferencia de que las capas más compactadas aparecieron a menor profundidad en el tratamiento A (10-20 cm), con respecto al tratamiento B (15-30 cm). En este último caso, sobre todo hacia las zonas donde no se aplicó fertilizante orgánico o no se fertilizó.

De forma general, la resistencia a la penetración siempre fue menor en las parcelas correspondientes al tratamiento C, con restos de cosecha, que actúan como un colchón de amortiguamiento entre el sistema de rodaje de la maquinaria agrícola y el suelo.

Para atenuar los efectos de la compactación del suelo por efecto de las labores mecanizadas en el cultivo de la caña de azúcar, se recomienda mantener el suelo cubierto con los residuos de cosecha y la aplicación de fertilización orgánica.

Contribución de autores....

Juan Alejandro Villazón Gómez: Participación activa en la revisión bibliográfica, Participación activa en la elaboración de la metodología, Participación activa en la discusión de los resultados, Revisión y aprobación de la versión final del artículo. George Martín Gutiérrez: Participación activa en la discusión de los resultados, Revisión y aprobación de la versión final del artículo. Yakelín Cobo Vidal: Participación activa en la revisión bibliográfica, Revisión y aprobación de la versión final del artículo.

LITERATURA CITADA

Acevedo, D. C., E. Hernández Acosta, R. Maldonado Torres, y M. E. Álvarez Sánchez. 2015. Variabilidad espacial del carbono en un suelo después de 10 años de retiro e incorporación de residuos de cosecha. *Terra Latinoamericana* 33(3):199-208.

- Araújo, D. C. S., S. M. G. L. Montenegro, A. A. A. Montenegro, V. P. Silva Junior, and S. M. Santos. 2018. Spatial variability of soil attributes in an experimental basin in the semi-arid region of Pernambuco, Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 22(1):38-44. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n1p38-44>.
- Barbosa, L. C., Z. M. de Souza, H. C. J. Franco, R. Otto, J. R. Neto, A. L. Garside, and J. L. N. Carvalho. 2018. Soil texture affects root penetration in Oxisols under sugarcane in Brazil. *Geoderma Regional* 13:15-25. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2018.03.002>.
- Bindraban, P. S., C. Dimkpa, L. Nagarajan, A. Roy, and R. Rabbinge. 2015. Revisiting fertilizers and fertilization strategies for improved nutrient uptake by plants. *Biology and Fertility of Soils* 51:897-911. <https://doi.org/10.1007/s00374-015-1039-7>.
- Biondi, F., D. E. Myers, and Ch. C. Avery. 1994. Geostatistically modeling stem size and increment in an old-growth forest. *Canadian Journal of Forest Research* 24(7):1354-1368.
- Bosch Mayol, M., J. L. Costa, F. N. Cabria, y V. C. Aparicio. 2012. Relación entre la variabilidad espacial de la conductividad eléctrica y el contenido de sodio del suelo. *Ciencia del Suelo* 32(2):95-105.
- Cambardella, C. A., T. B. Moorman, J. M. Novak, T. B. Parkin, D. L. Karlen, R. F. Turco, and A. E. Konopka. 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. *Soil Science Society of American Journal* 58:1501-1511.
- Castioni, G. A., M. R. Cherubin, L. M. S. Menandro, G. M. Sanches, R. O. Bordonal, L. C. Barbosa, H. C. J. Franco, and J. L. N. Carvalho. 2018. Soil physical quality response to sugarcane straw removal in Brazil: A multiapproach assessment. *Soil & Tillage Research* 184:301-309. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.007>.
- Carvalho, A. A., T. G. F. Silva, M. G. Queiroz, G. N. Araújo Júnior, A. M. R. F. Jardim, e C. A. A. Souza. 2017. Estabilidade temporal e variabilidade espacial da umidade de um argissolo cultivado com palma forrageira. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* 11(7):1998-2009.
- Castañeda Sánchez, D. A., D. F. Jaramillo Jaramillo, y J. M. Cotes Torres. 2014. Selección de propiedades del suelo espacialmente relacionadas con producción en el cultivo de banano. *Ciencia del Suelo* 32(1):73-83.
- Cavalcanti, R. Q., M. M. Rolim, R. P. Lima, U. E. Tavares, E. M. R. Pedrosa, and I. F. Gomes. 2019. Soil physical and mechanical attributes in response to successive harvests under sugarcane cultivation in Northeastern Brazil. *Soil & Tillage Research* 189:140-147. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.01.006>.
- Cavalcanti, R. Q., M. M. Rolim, R. P. de Lima, U. E. Tavares, E. M. R. Pedrosa, and M. R. Cherubin. 2020. Soil physical changes induced by sugarcane cultivation in the Atlantic Forest biome, northeastern Brazil. *Geoderma* 370:114353. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114353>.
- Cherubin, M. R., D. L. Karlen, A. L. C. Franco, C. A. Tormena, C. E. P. Cerri, C. A. Davies, and C. C. Cerri. 2016. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. *Geoderma* 267:156-168. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.01.004>.
- Cherubin, M. R., M. R. A. Franchi, R. P. Lima, M. T. Moraes, and F. B. Luz. 2021. Sugarcane straw effects on soil compaction susceptibility. *Soil & Tillage Research* 212:105066. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105066>.
- Clark, L. J., W. R. Whalley, and P. B. Barraclough. 2003. How do roots penetrate strong soil? *Plant and Soil* 255:93-104.
- Dhaliwal, S. S., R. K. Naresh, A. Mandal, R. Singh, and M. K. Dhaliwal. 2019. Dynamics and transformations of micronutrients in agricultural soils as influenced by organic matter build-up: A Review. *Environmental and Sustainability Indicators* 1-2:100007. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2019.100007>.
- Dexter, A. R. 1986. Model experiments on the behavior of roots at the interface between a tilled seed-bed and a compacted sub-soil. I- Effects of seed-bed aggregate size and sub-soil strength on wheat roots. *Plant and Soil* 95:123-133.
- Díaz, B., B. Barreto, P. Cairo, E. Pineda, R. Mas, F. Acosta, E. Becerra, B. Clavelo y R. Quiñones. 2010. La aplicación de fertilizantes orgánicos y minerales naturales en el cultivo de lacaña de azúcar II.- Efecto a largo plazo sobre el rendimiento y la calidad del suelo. *Centro Azúcar* 37(1):35-42.
- Esteban, D. A. A., Z. M. de Souza, C. A. Tormena, L. H. Lovera, E. de S. Lima, I. N. Oliveira, and N. P. Ribeiro. 2019. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. *Soil & Tillage Research* 187: 60-71. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.015>.

- Esteban, D. A. A., Z. M. de Souza, R. B. da Silva, E. de S. Lima, L. H. Lovera, and I. N. de Oliveira. 2020. Impact of permanent traffic lanes on the soil physical and mechanical properties in mechanized sugarcane fields with the use of automatic steering. *Geoderma* 362:114097. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114097>.
- García Ruiz, I., A. L. Castillo Ontaneda y M. L. Vidal Díaz. 2020. Impactos críticos del penetrómetro como criterio para estimar la compactación del suelo y decidir labores en caña de azúcar. *Revista Científica Agroecosistemas* 8(1):29-38.
- Hamza, M. A., and W. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research* 82:121-145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>.
- Hernández Jiménez, A., J. M. Pérez Jiménez, D. Bosch Infante, D., and N. Castro Speck. 2015. Clasificación de los suelos de Cuba. Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. San José de Las Lajas, Cuba.
- Holthusen, D., A. A. Brandt, J. M. Reichert, R. Horn, H. Fleige, and A. Zink. 2018. Soil functions and in situ stress distribution in subtropical soils as affected by land use, vehicle type, tire inflation pressure and plant residue removal. *Soil & Tillage Research* 184: 78-92. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.07.009>.
- Leiva, J. O. R., R. A. Silva, R. N. Buss, V. L. França, A. A. Souza, and G. M. Siqueira. 2019. Multifractal analysis of soil penetration resistance under sugarcane cultivation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 23(7):538-544. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n7p538-544>.
- Luca, E. F., V. Chaplot, M. Mutema, C.Feller, M. L. Ferreira, C. C. Cerri, and H. T. Z. Couto. 2018. Effect of conversión from sugarcane preharvest burning to residues green trashing on SOC stocks and soil fertility status: Results from different soil conditions in Brazil. *Geoderma* 310:238-248. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.09.020>.
- Martínez Ramírez, R., M. Rodríguez Orozco, Y. Betancourt Rodríguez, O. González Cueto, S. Guillén Sosa, y L. Vidal Díaz. 2021. Cosecha de caña de azúcar en suelos arcillosos pesados con alta humedad. *Ingeniería Agrícola* 11(4):e09.
- Miqueloni, D. P., E. M. Gianello, e C. R. P. Bueno. 2015. Variabilidade espacial de atributos e perda de solo na definição de zonas de manejo. *Pesquisa Agropecuaria Tropical* 45(1):18-28.
- Quiroz Guerrero, I., y A. Pérez Vázquez. 2013. Vinaza y compost de cachaza: efecto en la calidad del suelo cultivado con caña de azúcar. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas (especial)* 5:1069-1075. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i5.1313>.
- Rasche Álvarez, J. W., E. Jandrey Gomez, D. A. Fatecha Fois, y C. A. Leguizamón Rojas. 2020. Compactación del suelo y su efecto en el crecimiento vegetativo de soja, maíz y guandú. *Investigaciones Agrarias* 22(1):13-21.
- Reichert, J. M., A. A. Brandt, M. F. Rodrigues, D. J. Reinert, and J. A. Braidá. 2016. Load dissipation by corn residue on tilled soil in laboratory and field-wheeling conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 96: 2705-2714. <https://doi.org/10.1002/jsfa.7389>.
- Rodríguez, L. A., J. J. Valencia, and J. A. Urbano. 2012. Soil compaction and tires for harvesting and transporting sugarcane. *Journal of Terramechanics* 49:183-189. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2012.04.002>.
- Sanches, G. M., P. S. G. Magalhães, O. T. Kolln, R. Otto, F. Rodrigues Jr, T. F. Cardoso, M. F. Chagas, and H. C. J. Franco. 2021. Agronomic, economic, and environmental assessment of site-specific fertilizer management of Brazilian sugarcane fields. *Geoderma Regional* 24:e00360. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2021.e00360>.
- Santos, D. P., A. A. A. Montenegro, R. A. A. Rodrigues, D. C. S. Araújo, C. S. Santos, e J. F. Cruz Neto. 2018. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em vale aluvial na região de Pernambuco. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* 12(1):2271-2282.
- Santos, R. O., L. B. Franco, S. A. Silva, G. A. Sodrê, and A. A. Menezes. 2017. Spatial variability of soil fertility and its relation with cocoa yield. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 21(2):88-93. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n2p88-93>.
- Seidel, E. J., and M. S. Oliveira. 2016. A classification for geostatistical index of spacial dependence. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 40:1-10.

- Silva, E. R. O. S., M. G. Pereira, M. M. Barros, L. M. M. Santos, and J. H. G. Gomes. 2022. Soil organic matter fractions and multivariate analysis in the definition of pasture management zones. *Engenharia Agrícola* 42(6):e20220099. <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v42n6e20220099/2022>.
- Siqueira, T. M., J. A. S. Louzada, O. C. Pedrollo, N. M. R. Castro, and M. H. C. Oliveira. 2019. Soil physical and hydraulic properties in the Donato stream basin, RS, Brazil. I.- Spatial variability. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 23(9):669-674. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n9p669-674>.
- Souza, D. H. S., Ê. F. F. Silva, A. Paz González, G. M. Siqueira, J. S. Silva, and D. C. Dantas. 2023. Spatial variability of physical attributes of a Spodosol and sugarcane yield. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 27(7):521-530. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n7p521-530>.
- Souza, J. M., L. R. Pereira, E. F. Reis, e R. Bonomo. 2016. Variabilidade espacial da capacidade de campo e ponto de murcha permanente em argiloso amarelo coeso. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* 10(5):875-882. <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v10n500457>.
- Stolf, R. 1991. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 15:229-235.
- Stolf, R., J. Fernández, e V. L. Furlani. 1983. Recomendação para uso do penetrômetro de impacto medelo IAA/planasucar-Stolf. *Revista Açúcar, Alcool e Subproductos* 1(3):235-241.
- Sun, Y., W. Guo, D. C. Weindorf, F. Sun, S. Deb, G. Cao, J. Neupane, Z. Lin, and A. Raihan. 2021. Field-scale spatial variability of soil calcium in a semi-arid region: Implications for soil erosion and site-specific management. *Pedosphere* 31(5):705-714. [http://10.1016/S1002-0160\(21\)60019-X](http://10.1016/S1002-0160(21)60019-X).
- Trinidad Santos, A., y J. Velasco Velasco. 2016. Importancia de la materia orgánica en el suelo. *Agroproductividad* 9(8):52-58.