

Compactación del suelo y su efecto en el crecimiento vegetativo de soja, maíz y guandú

Soil compaction and its effect on the vegetative growth of soybean, corn and pigeon pea

Jimmy Walter Rasche Alvarez^{1,2} , Esteban Jandrey Gomez² , Diego Augusto Fatecha Fois^{1,2}  y Carlos Andrés Leguizamón Rojas¹ 

¹ Universidad Nacional de Asunción, Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay.

² Universidad Nacional de Canindeyú, Facultad de Ciencias Agrarias y Ambientales. Katueté, Canindeyú, Paraguay.

*Autor para correspondencia:

jwrasche@yahoo.com.ar

Conflicto de interés:

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Licencia:

Artículo publicado en acceso abierto con una licencia Creative Commons CC-BY

Historial:

Recibido: 18/02/2019;

Aceptado: 09/03/2020

Período de Publicación:

Enero-Junio de 2020

RESUMEN

El crecimiento radicular y el rendimiento de un cultivo son afectados por la compactación del suelo. El objetivo de este trabajo fue evaluar el desarrollo de los cultivos de soja (*Glycine max* (L.) Merr.), maíz (*Zea mays* L.) y guandú (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) en suelo arcilloso con diferentes densidades en Katueté, Canindeyú. El diseño experimental fue completamente al azar con un arreglo factorial de tratamientos (3 x 4). Los factores fueron cultivos (soja, maíz y guandú) y densidades de suelo (0,9; 1,19; 1,39 y 1,59 g cm⁻³), con 4 repeticiones. Las unidades experimentales consistieron en tubos de PVC con 20 cm de diámetro y 48,5 cm de altura, divididos en tres secciones: A (0-10 cm), B (10-13,5 cm), donde fue simulada la compactación del suelo y C (13,5-48,5 cm), respectivamente. Se realizó análisis de varianza y comparación de medias con la prueba de Tukey al 5%. Se determinó altura de planta a los 30, 60 y 75 días, diámetro de planta, peso de materia verde y seca, área de raíces y peso seco de raíces. El maíz presentó diferencia significativa en la altura de planta a los 75 días con la mayor densidad de suelo. En lo que se refiere a área y peso seco de raíces estos fueron superiores en el maíz en las capas A y B. La densidad del suelo afectó negativamente al peso seco de raíces en la sección B siendo mayor con densidad de suelo de 1,19 g cm⁻³ (5,37 g maceta⁻¹) y menor con densidad 1,59 g cm⁻³ (4,79 g maceta⁻¹). En la sección C la densidad del suelo no afectó la materia seca de raíces de soja y guandú, pero disminuyó en el maíz. Suelos con capas compactadas afectan mayormente al desarrollo radicular del maíz, comparado a la soja y guandú.

Palabras claves: *Cajanus cajan*, *Glycine max*, *Zea mays*, crecimiento radicular, densidad del suelo.

ABSTRACT

Soil compaction affects root growth and crop yield. The objective of this work was to evaluate the development of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.), corn (*Zea mays* L.) and pigeon pea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) crops in different soil densities. The experimental design was completely randomized, with treatments arranged in a 3 x 4 factorial scheme, with three crops (soybean, corn and pigeon pea) and four soil densities (0.9; 1.19, 1.39 and 1.59 g cm⁻³), with 4 replications. The experimental units consisted of PVC tubes with 20 cm diameter and 48.5 cm height, divided into sections: A (0-10 cm), B (10-13.5 cm), where the compaction was simulated and C (13.5-48.5 cm), respectively. ANOVA was used at 5% probability and where there was significance, Tukey test performed mean comparison. Plant height was determined at 30, 60 and 75 days, plant diameter, weight of green and dry matter, root area and root dry weight. Corn showed the highest values in the evaluated parameters of the aerial part. There was a significant difference between the soil compaction levels in plant height at 75 days with the highest soil density. In terms of area and dry weight of roots, they were higher in maize in sections A and B. Soil density negatively affected the dry weight of roots in section B, being higher with soil density of 1.19 g cm⁻³ (5.37 g pot⁻¹) and smaller with density 1.59 g cm⁻³ (4.79 g pot⁻¹). In section C soil density did not affect dry matter of soybean roots and pigeon pea, but decreased in corn. Soil compaction mainly affects the root development of corn, compared to soybean and pigeon pea.

Keywords: *Cajanus cajan*, *Glycine max*, *Zea mays*, root growth, soil density.

INTRODUCCIÓN

Las propiedades físicas del suelo determinan en gran medida su capacidad de uso. La condición física de un suelo establece la rigidez y la fuerza de sostenimiento, la facilidad para la penetración de raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad, y la retención de nutrientes (Quirijn, 2010). Se considera necesario para las personas involucradas en el uso de la tierra conocer las propiedades físicas del suelo a fin de entender en qué medida estas influyen en el crecimiento de las plantas y cómo la actividad humana puede llegar a modificarlas (Stefanoski, Santos, Marchão, Petter y Pacheco, 2013).

La porosidad y la densidad aparente del suelo son propiedades relacionadas con alteraciones en el volumen del suelo, y que la densidad aparente presenta una relación inversa con la porosidad, donde la textura del suelo juega un papel importante en la densidad aparente Reinert, Reichert y Silva, (2001) propusieron como valores críticos de densidad de suelo aproximadamente $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ para suelos con horizontes de textura arcillosa (más de 55% de arcilla), $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ para suelos con horizontes de textura media (arcilla entre 20 a 55%) y de $1,65 \text{ g cm}^{-3}$ para suelos con textura arenosa (menos de 20% de arcilla).

La densidad aparente además de variar de acuerdo a la textura, puede también variar estacionalmente por el efecto de labranzas, sistema de cultivo, contenido de materia orgánica y por la humedad del suelo, donde la deformación del suelo tiene una relación directa con la porosidad total, cuanto mayor es la deformación del suelo, mayor es la reducción de la macroporosidad y de porosidad total (Quirijn, 2010; Scalone, 2012; Rossetti e Centurión 2015; Lopes, Oliveira, Rodrigues e Drinko, 2015).

En el proceso de compactación ocurre una reducción del espacio poroso, reducción que afecta generalmente a los macroporos, que son los responsables por la infiltración de agua y la aireación del suelo (Reichert, Suzuki e Reinert, 2007). Actualmente, la compactación del suelo es un problema común que ocurre a medida que se prioriza el rendimiento operacional (ha hora⁻¹) de las máquinas e implementos, y se deja al manejo adecuado del suelo en segundo plano. Esto representa un grave problema para la calidad del suelo y el desarrollo de la agricultura sostenible porque modifica el flujo de agua y aire en el suelo, reduce la absorción de nutrientes y la productividad de los cultivos agrícolas (Araújo, Ker, Neves e Lani, 2012; Bonnin e Lanças, 2013; Torres, Gutierrez y Beltran, 2017; Enciso, 2019).

La camada compactada del suelo puede variar de acuerdo a la profundidad, al manejo realizado, a la clase textural de suelo y al tamaño de maquinarias

empleadas (Reichert et al., 2007). Una alternativa para aliviar este problema es el uso de especies con sistema radicular profundo y vigoroso (Reinert, Albuquerque, Reichert, Aita e Cubilla Andrada, 2008), con la introducción de especies de raíces más vigorosas y que crezcan en suelos con problemas de impedimentos físicos y permitan aumentar la biomasa sobre y en el suelo, de modo a disminuir la densidad aparente, aumentar la porosidad y aireación del mismo y que pueda ser sembrado en épocas periféricas a la de los principales cultivos de granos principales, siendo que la sucesión soja-maíz realizada en la zona Este del departamento de Canindeyú agrava la problemática, por lo que abonos verdes de raíces de crecimiento más rústico y vigorosos como el guandú podrían ayudar en la descompactación del suelo.

El objetivo del trabajo fue evaluar la influencia de niveles de compactación determinados por diferentes densidades de suelo sobre el desarrollo de los cultivos de soja (*Glycine max* (L.) Merr.), maíz (*Zea mays* L.) y guandú (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.).

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo de investigación se desarrolló en el campo experimental de la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales de la Universidad Nacional de Canindeyú (FCAA-UNICAN), Filial Katueté, con las siguientes coordenadas geográficas 24°24'71" S; 54°74'95" O. El suelo utilizado en el experimento fue recolectado del mismo local de la FCAA, Filial Katueté, clasificado como Rhodic Kandiodox (López et al., 1995), con 56% de arcilla.

Las unidades experimentales consistieron en tubos de PVC con 20 cm de diámetro y altura de 48,5 cm. Los tubos de PVC se montaron con tres anillos sobrepuestos; el primer anillo que fue la base disponía una altura de 34,5 cm (Sección C); el anillo intermedio una altura de 3,5 cm en el cual se simuló la compactación del suelo (Sección B) y por último se colocó otro anillo de 10 cm de altura para la germinación de las semillas (Sección A) (Figura 1). Esta metodología fue adaptada de otras investigaciones que usan diseño semejante, aunque en ocasiones con diferentes diámetros de recipiente o altura de las secciones (Silva, Maia e Bianchini, 2006; Jimenez et al., 2008; Farias et al., 2013; Fagundes, Silva e Bonfim-Silva, 2014; Lima, Petter e Wilson, 2015).

Los tres anillos se unieron con una cinta adhesiva para mantener las secciones estables y firmes. Los tubos de PVC de 3,5 cm (Sección B) en los cuales se simulaban las compactaciones tuvieron sus áreas interiores revestidas de caolín, un mineral no expansible con el proceso de secado y humedecimiento, para evitar el crecimiento de las

raíces entre el suelo compactado y la superficie de la pared interna del tubo.

El suelo arcilloso, fue extraído de una zona de pastura a una profundidad de 20 cm y aproximadamente 5

m². Se tamizó el suelo extraído con tamiz de 2 mm de malla para poder entonces corregir y fertilizar el mismo con cal agrícola, yeso agrícola, fósforo y potasio ya que se presentaba ácido y con bajo nivel de nutrientes (Tabla 1).

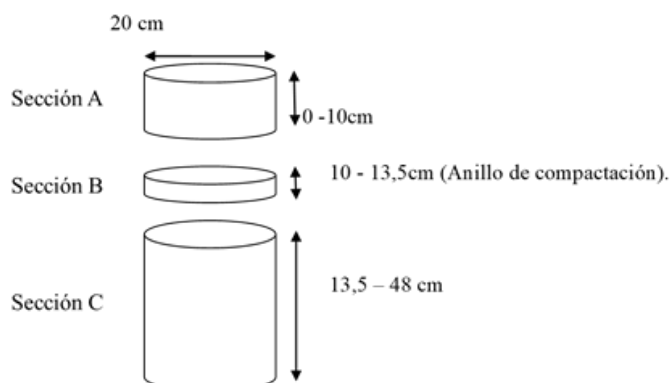


Figura 1. Esquema y dimensiones de cada unidad experimental. Katueté, Canindeyú, 2016.

Tabla 1. Características físicas y químicas del suelo donde fue realizado en el experimento.

Prof.	pH	M.O.	Na+2	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K+	Al ⁺³ +H ⁺	P	Arcilla
cm.	agua	%	----- cmol _c dm ⁻³ -----				mg kg ⁻¹	%	
0-20	4,50	2,66	0,00	0,38	0,45	0,04	1,25	0,2	56

Extractores: pH= Agua; P y K⁺= Mehlich-1; Ca⁺² + Mg⁺² y Al³⁺= KCl 1mol L⁻¹; Textura por Bouyoucus

Una vez tamizado, corregido y fertilizado el suelo considerando las recomendaciones realizada por Fatecha (2001) y antes de realizar la compactación correspondiente en los anillos de la Sección B, se cargaron los tubos de PVC con el suelo tratado, compactándolo mediante la utilización de un artefacto de metal diseñado conforme al diámetro de los tubos de PVC en los anillos correspondientes de acuerdo a cada tratamiento, y dejando reposar por el periodo de ocho días, antes de realizar la siembra.

El diseño experimental fue el completamente al azar con un arreglo factorial de tratamientos (3 x 4). Los factores fueron cultivos (soja, maíz y guandú) y densidades de suelo (0,9; 1,19; 1,39 y 1,59 g cm⁻³), con 4 repeticiones. Los cultivos de soja y maíz son los cultivos más sembrados en esta zona del país, y el guandú podría ser una alternativa para la descompactación del suelo, razón por los cuales fueron elegidos para el experimento.

Para determinar las distintas densidades que simularon las compactaciones, se procedió a enviar una muestra del suelo a un laboratorio a fin de realizar el ensayo de compactación de Proctor, el cual determina la densidad máxima de un suelo en relación con su grado de humedad (Stancati et al., 1981).

El ensayo de compactación de Proctor estableció que el suelo a utilizarse en el experimento puede

llegar a una máxima compactación de 1,79 g cm⁻³ con una humedad de 26%. Con estos resultados se estableció que dentro del factor uno, la máxima densidad sería de 1,59 g cm⁻³ que correspondía al 80% de la máxima capacidad de compactación del suelo y en base a esto se disminuyó las demás en un intervalo de 0,2 g cm⁻³ llegando a la menor densidad de 0,9 g cm⁻³ de forma que esta última coincida con la densidad aparente no alterada del suelo a utilizar, para la cual se utilizó suelo suelto.

Para simular las compactaciones primeramente se determinó el volumen del tubo de PVC de 3,5 cm determinando la densidad aparente del suelo deseada y el volumen del recipiente en la sección B, posteriormente se pesó el suelo seco que se debería contener en cada tratamiento, se compactó el suelo humedecido de acuerdo a cada tratamiento.

La siembra de los cultivos se realizó ocho días después de cargados y montados los tubos de PVC. Se depositaron 10 semillas en las unidades experimentales de los cultivos de soja y guandú y 6 semillas en las unidades experimentales de maíz. A los siete días de la emergencia de estos se seleccionaron 6 plantas en cada unidad experimental de los cultivos de soja y guandú y 3 plantas en las unidades experimentales del cultivo de maíz. Los tubos se colocaron a medio metro de distancia entre sí para que no haya competencia por luz solar entre las plantas de cada unidad experimental.

La variedad de soja que se utilizó fue la Nidera 5909, que es una variedad con un hábito de crecimiento indeterminado, súper precoz con una alta productividad. Tiene un ciclo estimado de 92 a 116 días y se caracteriza por una máxima estabilidad en diferentes ambientes (Pegoraro, 2013). El maíz que se utilizó fue la variedad Pioneer 4285HX que se caracteriza por su precocidad y alta producción, con una altura de plantas de 210 centímetros, por ser una Poaceae, su sistema radicular es fasciculado. El guandú, así como la soja es una Fabaceae, con raíz pivotante, pero de gran porte y con un potente sistema radicular, muy utilizado como abono verde por su aporte de materia verde y reciclaje de nutrientes. Es utilizado para descompactar suelos en grados no muy severos de compactación.

Los cuidados culturales se realizaron de acuerdo a la necesidad de los cultivos, apuntando al desarrollo adecuado de las plantas objeto de estudio. El riego se realizó manualmente dejando la humedad siempre por encima del 50% de la capacidad de campo, por lo que se regaba de una a tres veces al día dependiendo de las condiciones ambientales.

Se determinó la altura de planta a los 30, 60 y 75 días midiendo desde la base hasta el ápice con una regla centimetrada, promediándose por la cantidad de plantas contenidas en cada unidad experimental.

Para determinar el diámetro en el cuello de las plantas se midió el mismo con un paquímetro a una altura de 2 cm del suelo a los 75 días después de la siembra, posteriormente, las plantas fueron cortadas a los 75 días después de realizada la siembra, al ras del suelo y posteriormente pesadas en una balanza de precisión de un decimal y se expresaron los resultados de materia verde de cada maceta en gramos. Para el peso de materia seca, las plantas de cada unidad experimental se acondicionaron en bolsas de papel y se llevaron a una estufa con una temperatura de 65°C, hasta obtener peso constante de las muestras. Posteriormente secas, las plantas se pesaron en una balanza de precisión de un decimal y se expresaron los resultados de cada maceta en gramos (Correa, 2006).

En relación a las raíces, primeramente, se realizó el desmontaje de los tubos de PVC, dividido en las tres secciones constituyentes. Se procedió a realizar la limpieza de raíces, extrayendo la mayor parte de suelo sobreponiendo el sistema radicular sucio en un tamiz de 2 mm, lavando con agua corriente con ayuda de una manguera, finalizando el lavado del sistema radicular sobre un tamiz de malla de 1 mm hasta la separación total del suelo de las raíces. Después de separadas y limpias, se eliminó el exceso de agua en las raíces, seguidamente se almacenaron en recipientes plásticos debidamente etiquetados, contenidos en una solución de alcohol al 30%. De

cada unidad experimental se obtuvo tres muestras de raíces (tres profundidades), generándose un total de 144 muestras de raíces en el experimento.

Para obtener el área de las raíces se utilizó un escáner específico denominado Área meter. Primeramente, se escurrieron todas las raíces de cada frasco y se procedió a obtener una sub muestra de 1 gramo, cada sub muestra de 1 gramo se distribuyó de forma que no haya superposición de raíces, en una hoja de plástico transparente. Se realizó lectura de la misma conteniendo las raíces en el escáner, el cual brindó el área en centímetros cuadrados (cm²).

Se obtuvo el peso seco de las raíces posterior a la obtención del área radicular. Se colocaron las raíces escurridas de cada una de las 144 muestras, en bolsas de papel y se llevaron a estufa con una temperatura de 65°C por un periodo de 72 horas, hasta obtener peso constante. Después de secas las raíces, se pesaron con balanza de precisión y los mismos fueron expresados en gramos (Correa, 2006).

Los datos fueron sometidos al análisis de varianza utilizando el programa Assistat 7.7 beta (Silva y Azevedo, 2016). Donde hubo significancia ($p < 0,05$), se aplicó la comparación de medias del test de Tukey para la comparación de las variables entre los cultivos, y el test de Tukey y curva de regresión cuando las variables estuvieran relacionadas con los niveles de compactación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Altura de planta

La altura de planta presentó diferencias significativas ($p < 0,05$), entre los cultivos en todas las evaluaciones (30, 60 y 75 días) y entre las densidades del suelo a los 75 días (Tabla 2). No fue observada interacción entre cultivos y diferentes densidades de suelo.

La mayor altura de planta se observó en el cultivo de maíz en los tres momentos evaluados, comparada al guandú y soja que tuvieron un menor crecimiento. Ese resultado era de esperarse, por las características morfológicas y de crecimiento de cada uno de los tres cultivos implantados.

El crecimiento en altura de planta no presentó interferencia por el aumento de la densidad aparente del suelo a los 30 y 60 días, posiblemente porque las raíces aun no alcanzaron la región compactada del suelo. Sin embargo, a los 75 días después de la siembra fueron significativos entre tratamientos ($p < 0,05$) (Tabla 2).

Al no haber interacción entre los factores, significa que los tres cultivos presentaron la misma tendencia

Tabla 2. Altura de planta a los 30, 60 y 75 días de la siembra, diámetro del tallo, materia verde y materia seca aérea en el cultivo de soja, guandú y maíz y en diferentes densidades de suelo. Katueté, Canindeyú, 2016.

Cultivo	Altura	Altura	Altura	Diámetro del tallo	Materia verde	Materia seca
	30 días	60 días	75 días			
	cm			g maceta ⁻¹		
Soja	16,3 c*	33,0 c	33,6 c	0,50 c	126,0 c	35,1 c
Guandú	22,9 b	54,8 b	65,4 b	0,61 b	229,2 b	62,7 b
Maíz	34,0 a	79,8 a	99,3 a	1,64 a	630,0 a	124,3 a
DMS	1,5	2,6	3,1	0,05	43,9	10,8
Densidad del suelo (g cm ⁻³)						
0,9	24,4 a	55,6 a	63,9 b**	0,89 a	316,7 a	71,0 a
1,19	23,9 a	57,5 a	68,5 a	0,93 a	330,0 a	76,2 a
1,39	24,8 a	55,8 a	66,7 ab	0,92 a	329,1 a	74,5 a
1,59	24,5 a	54,5 a	65,2 ab	0,93 a	338,0 a	74,3 a
DMS	2,0	3,4	4,0	0,06	55,9	13,7

*Medias seguidas por letras iguales en la columna no difieren estadísticamente según el test de Tukey al 5% de probabilidad de error. ** Ec: $y = 21,201 + 73,892x - 29,185x^2$; $R^2 = 0,89$; DMS = Diferencia Media Significativa

de crecimiento, donde la altura de planta a los 75 días se ajusta a una ecuación cuadrática $y = 21,201 + 73,892x - 29,185x^2$; $R^2 = 0,89$, por lo que a medida que se compacta el suelo se observa disminución de la altura de planta, siendo el valor crítico de acuerdo a la ecuación obtenida, la de $1,27 \text{ g cm}^{-3}$.

Este resultado sugiere que pequeños niveles de compactación en el suelo son benéficos, un poco de compactación del suelo es necesaria, debido a que aumenta la conductividad hidráulica insaturada, la superficie de contacto de las raíces con el suelo y la tasa de absorción de agua y el transporte de nutrientes hasta las raíces (Leonel et al., 2007; Fagundes et al., 2014).

Da Silva, Albuquerque e Costa (2014) observaron que en suelos arcillosos, densidad aparente superior a $1,14 \text{ g cm}^{-3}$ promueve la disminución de la altura de planta de soja, sin embargo en el presente experimento se observó efecto negativo de la compactación sobre los cultivos con la densidad de $1,27 \text{ g cm}^{-3}$. La aplicación de agua todos los días para evitar el marchitamiento de las mismas, considerando que el volumen de suelo explotado por las plantas es pequeña, a diferencia de los que ocurre en el campo, puede explicar en parte la falta de respuesta de los cultivos a la compactación del suelo a menores niveles de compactación. Las plantas pueden tener diferentes comportamientos ante la misma densidad del suelo, Silva, Alves, Mesquita e Leandro (2012) constataron que la compactación del suelo no afectó el crecimiento del cultivo de piñón (*Jatropha curcas* L.) pero sí lo hizo en el cultivo de cambre (*Crambe abyssinica* Hochst), aunque el experimento era regado todos los días y se mantenía húmedo.

Diámetro del cuello, materia verde y seca

En el caso del diámetro de tallo, materia verde y

materia seca, estos fueron diferentes estadísticamente ($p < 0,05$) según la especie evaluada, sin embargo, no hubo efecto con relación a los diferentes niveles de compactación, tampoco se observó interacción entre los mismos en las tres variables.

El maíz y la soja presentaron el mayor y menor diámetro de tallo ($1,62$ y $0,50 \text{ cm}$), las mayores y menores producciones de materia verde ($616,3$ y $125,6 \text{ g maceta}^{-1}$) y materia seca ($120,4$ y $35,0 \text{ g maceta}^{-1}$), respectivamente (Tabla 2), esa diferencia se debe a la morfología de la planta.

No hubo efecto de la densidad del suelo sobre el diámetro del tallo y producción de materia verde o materia seca, aunque se observa una tendencia de disminución de estas variables con el aumento de la densidad del suelo.

Reichert, Suzuki, Reinert, Horn & Häkansson (2009) consideran que densidades por arriba de $1,35 \text{ g cm}^{-3}$ en suelos muy arcillosos (62% de argila) limitan el crecimiento radicular de las plantas. Sin embargo, a campo muchas veces ha sido observado tolerancia de la soja a suelos compactados, considerando que en suelos arcillosos, con densidad igual o superior a $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ no se ha visto afectado el crecimiento de la soja (Reinert et al., 2001). En ese sentido, Secco, Reinert, Reichert e Ros (2004) trabajando con densidades de suelo entre $1,28$ y $1,51 \text{ g cm}^{-3}$ y Cardoso et al. (2006) en un suelo con 78% de arcilla, con densidad entre $1,17$ hasta $1,38 \text{ g cm}^{-3}$ no encontraron disminución de la producción de soja con el aumento de la densidad del suelo.

La producción de materia seca de un cultivo es importante, pues a mayor producción de materia seca existe mayor probabilidad de aumentar el rastrojo incorporado o sobre la superficie del suelo que puede aumentar la materia orgánica del suelo,

influyendo positivamente en la disminución de la densidad del suelo a mediano y largo plazo (Rosim, De Maria, Silva e Silva, 2012).

Contrariamente a la presente investigación, Farias et al. (2013) observaron reducción en el diámetro del cuello del tallo en el guandú al aumentar los niveles de compactación del suelo, González Cueto, Iglesias Coronel y Herrera Suárez (2009) verificaron reducción de las variables del crecimiento vegetativo del maíz por efecto de la compactación y Müller, Ceccon e Rosolem (2001), en un estudio con 5 especies de abonos verdes y diferentes niveles de compactación del suelo observaron efecto negativo sobre el peso de materia verde de los mismos. Respuestas contradictorias pueden presentarse por el hecho de que las complejas interacciones de las propiedades físicas del suelo y el crecimiento de plantas pueden generar respuestas no esperadas, lo que explicaría el comportamiento de la materia seca. Además, experimentos realizados en ambientes controlados, con riegos diarios, difieren de las condiciones del campo donde no siempre se reúnen las características agronómicas y de cuidado ideales para el cultivo, por lo que el aumento de la densidad del suelo puede no haber afectado el crecimiento radicular. En ese sentido Suzuki, Reichert, Reinert e Lima (2007) sostienen que la productividad de las culturas depende de varios factores como propiedades físicas, químicas, biológicas del suelo, manejo de la cultura, especie de planta y factores climáticos.

Área de raíces y peso seco de raíces

En la variable área de raíces hubo comportamiento diferenciado entre las tres capas de suelo evaluadas. El maíz presentó mayor área de raíces que la soja y el guandú, en las capas 0-10 cm (Sección A) donde el suelo se encontraba sin compactarse y en la capa 10-13,5 cm (Sección B) con tratamiento de compactación del suelo (Tabla 3).

La mayor área de raíces en el maíz se debe a que el cultivo posee raíz fibrosa, comparadas a la soja y al guandú que son fabáceas, con un sistema radicular muy similar, poseen una menor área que las gramíneas. En lo que se refiere a la compactación del suelo de la sección B, esta no afectó al crecimiento de la sección A, y tampoco hubo disminución del área de raíces por efecto del aumento de la densidad del suelo (Tabla 3).

Sin embargo, en la capa de 13,5-48,5 cm (Sección C) que se encuentra por debajo de la capa compactada hubo un comportamiento distinto a las capas anteriores, habiendo interacción entre el cultivo y la densidad del suelo. Cuando se compara el área de raíces en los tres cultivos, considerando la compactación de la capa superior (Sección B),

sobre el crecimiento de raíces en la Sección C, se observa que cuando no hay aumento de la densidad del suelo, el maíz presenta mayor área radicular, pero al aumentar la densidad del suelo, el maíz empieza a disminuir el área de raíces siendo inferior al del guandú. Estos datos corroboran la premisa de que el guandú crece en suelos compactados, cuando otros cultivos se ven afectados por el aumento de la densidad del suelo. El guandú, no fue afectado por el aumento de la densidad del suelo, en tanto la soja presentó mayor área de raíces con la densidad del suelo de $1,19 \text{ g cm}^{-3}$ y el maíz presentó la mayor área de raíces con la densidad de $0,9 \text{ g cm}^{-3}$.

En contrapartida al presente experimento donde la capa compactada (Sección B) no afectó el área de raíces, Foloni, Calonego e Lima (2003) al estudiar el efecto de la compactación del suelo en el desarrollo de raíces constataron que el diámetro radicular de las plantas de maíz aumentó significativamente en la capa de suelo compactado. Los suelos compactados promueven alteraciones morfológicas de las raíces, resultando en menor longitud radicular, distribución espacial y área superficial (Torres et al., 2017). Sin embargo, Materechera, Alston, Kirby & Dexter (1992) mencionan que la disminución del peso de raíces ocurre debido a la proliferación de raíces finas laterales, causada por la inhibición del alargamiento en la región apical de las raíces y no en la disminución propiamente dicha del diámetro de las raíces.

Considerando el peso seco de raíces de manera similar al área radicular, se observó que en todas las profundidades (Sección A, B y C) el maíz presentó, en promedio, mayor peso radicular que las otras especies (Tabla 4). Al estudiar las raíces de especies pertenecientes a diferentes familias y por ende con distintos comportamientos era esperado que los valores de peso de raíces obtenidos difieran.

Las diferentes densidades del suelo de la sección B no afectaron el resultado del peso seco total de las raíces de la sección A, pero si en la sección B y en la sección C. En la sección B, el mayor peso de raíces fue observada en la densidad $1,19 \text{ g cm}^{-3}$ y el menor peso de raíces con la mayor densidad del suelo ($1,59 \text{ g cm}^{-3}$) (Tabla 4). En la sección C hubo interacción entre los cultivos y la densidad del suelo, donde la soja y el guandú no fueron afectadas por el aumento de la densidad del suelo de la capa superior a esta, sin embargo, en el caso del maíz se observó que al aumentar la densidad del suelo a $1,59 \text{ g cm}^{-3}$ hubo disminución de la producción de materia seca de raíces, por lo que se puede inferir que el sistema radicular del maíz se ve afectado por capas compactadas de suelo y hace con que disminuya su crecimiento en profundidad, reduciendo la posibilidad de absorción de agua y nutrientes en tales condiciones.

Tabla 3. Área de raíces de soja, maíz y guandú de las secciones A, B y C de los tubos de PVC. Katueté, Canindeyú, 2016.

Cultivo	-----Densidad del suelo (g cm ⁻³)-----				
	0,9	1,19	1,39	1,59	Promedio
Área de raíces en Sección A (0 - 10 cm) (cm ² maceta ⁻¹)					
Soja	7,76	8,33	5,59	9,73	7,86 b*
Guandú	10,54	6,52	6,87	10,77	8,68 b
Maíz	15,62	8,65	13,68	11,19	12,29 a
Promedio	11,31 A	7,84 A	8,71 A	10,56 A	
Área de raíces en Sección B (10 - 13,5 cm) (cm ² maceta ⁻¹)					
Soja	6,21	5,36	8,53	7,37	6,87 b*
Guandú	6,16	7,24	5,02	4,13	5,64 b
Maíz	9,12	9,57	14,34	6,95	10,00 a
Promedio	7,17 A	7,40 A	9,30 A	6,15 A	
Área de raíces en Sección C (13,5 - 48,5 cm) (cm ² maceta ⁻¹)					
Soja	6,22 bAB*	9,22 aA	4,98 bB	5,91 aAB	6,33
Guandú	5,38 bA	6,23 aA	4,93 bA	6,55 aA	5,45
Maíz	13,83 aA	7,59 aB	10,90 aAB	7,68 aB	9,62
Promedio	8,48	7,68	6,94	6,71	
Test F	Sección A	Sección B	Sección C		
Cultivo (A)	*	*	*		
Densidad (B)	ns	ns	ns		
Interacción A x B	ns	ns	*		

*Significativo según Test de Tukey al 5%. Medias seguidas por letras minúsculas iguales en la columna y por letras mayúsculas iguales en la línea no difieren estadísticamente según el test de Tukey al 5% de probabilidad de error.

Tabla 4. Área de las raíces. Sección A, B y C de los tubos de PVC. Katueté, Canindeyú, 2016.

Cultivo	-----Densidad del suelo (g cm ⁻³)-----				
	0,9	1,19	1,39	1,59	Promedio
Área de raíces en Sección A (0 - 10 cm) (cm ² maceta ⁻¹)					
Soja	7,76	8,33	5,59	9,73	7,86 b*
Guandú	10,54	6,52	6,87	10,77	8,68 b
Maíz	15,62	8,65	13,68	11,19	12,29 a
Promedio	11,31 A	7,84 A	8,71 A	10,56 A	
Área de raíces en Sección B (10 - 13,5 cm) (cm ² maceta ⁻¹)					
Soja	6,21	5,36	8,53	7,37	6,87 b*
Guandú	6,16	7,24	5,02	4,13	5,64 b
Maíz	9,12	9,57	14,34	6,95	10,00 a
Promedio	7,17 A	7,40 A	9,30 A	6,15 A	
Área de raíces en Sección C (13,5 - 48,5 cm) (cm ² maceta ⁻¹)					
Soja	6,22 bAB*	9,22 aA	4,98 bB	5,91 aAB	6,33
Guandú	5,38 bA	6,23 aA	4,93 bA	6,55 aA	5,45
Maíz	13,83 aA	7,59 aB	10,90 aAB	7,68 aB	9,62
Promedio	8,48	7,68	6,94	6,71	
Test F	Sección A	Sección B	Sección C		
Cultivo (A)	*	*	*		
Densidad (B)	ns	*	ns		
Interacción A x B	ns	ns	*		

*Significativo según Test de Tukey al 5%. Medias seguidas por letras minúsculas iguales en la columna y por letras mayúsculas iguales en la línea no difieren estadísticamente según el test de Tukey al 5% de probabilidad de error.

Foloni et al. (2003) en un trabajo similar verificaron que la suma total de materia seca de las raíces en las secciones A, B y C no fueron alteradas con el aumento de la compactación, pero afirman que la camada compactada modifica la distribución del sistema radicular en el perfil del suelo, lo que fue observado

en el presente trabajo. Beutler e Centurion (2004) verificaron que el sistema radicular de la soja no sufrió alteración con la compactación del suelo, así como Reinert et al. (2008) investigando suelos con densidades menores a 1,75 g cm⁻³ constataron que el guandú presentó sistema radicular bien distribuido

en el perfil del suelo con la raíz pivotante llegando a profundidades mayores a 30 cm, no obstante, observaron reducción de raíces secundarias, lo que condice con el presente trabajo: Bergamin et al. (2008) también observaron que el aumento de la densidad del suelo afecta negativamente al sistema radicular del maíz.

CONCLUSIONES

No hay efecto del aumento de la densidad del suelo sobre características morfológicas de la parte aérea de los cultivos (altura a los 30 y 60 días, diámetro de plantas, materia verde y materia seca), con excepción de la altura de planta a los 75 días.

En áreas compactadas del suelo (Sección B) ocurre disminución de la materia seca de raíces de los cultivos, comparado con la zona no compactada.

El cultivo de maíz es más sensible a la compactación del suelo y presenta mayor limitación al desarrollo radicular en capas compactadas que la soja y el guandú.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Araújo, E. A., Ker, J. C., Neves, J. C. L. e Lani, J. L. (2012). Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. *Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia*, 5(1), 187-196.
- Bergamin, A. C., Tadeu Vitorino, A. C., Franchini, J. C., Souza, C. M. A. de e Souza, F.R. de. (2008). Compactação em um Latossolo Vermelho distroférrico e suas relações com o crescimento radicular do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34(3), 681-691.
- Beutler, A. N. e Centurión, J. F. (2004). Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 39(6), 581-588.
- Bonnin, J. J. e Lanças, K. (2013). Análisis de mapas de iso-compactación del suelo para el diagnóstico de la necesidad de subsolado de un área comercial de siembra directa. *Investigación Agraria*, 11(2): 9-12. Recuperado de: <http://www.agr.una.py/revista/index.php/ria/article/view/20>
- Cardoso, E. G., Zotarelli, L., Piccinin, J. L., Torres, E., Saraiva, O. F. e Guimarães, M. F. (2006). Sistema radicular da soja em função da compactação do solo no sistema de plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 41, 493- 501.
- Correa, M. (2006). *Desenvolvimento do sistema radicular do milho (Pennisetum americanum (L.) em duas classes de solo em densidades e diferentes profundidades da camada compactada*. Tesis Maestría em Agronomía. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Faculdade de Ciências Agrônomicas. Botucatu, 113 p.
- Da Silva, F. R., Albuquerque, J. A. e Costa, A. (2014). Crescimento inicial da cultura da soja em latossolo bruno com diferentes graus de compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38, 1731-1739.
- Enciso S. D. (2019). Distribución espacial de algunas propiedades físicas del suelo y su influencia en el rendimiento de maíz bajo manejo conservacionista. Tesis Maestría en Ciencia del Suelo y Ordenamiento Territorial. Universidad Nacional de Asunción. Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, 68 p
- Fagundes, E. A. A., Silva, T. J. A. da e Bonfim-Silva, E. M. (2014). Desenvolvimento inicial de variedades de cana-de-açúcar em Latossolo submetidas a níveis de compactação do solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18(2), 188-193. Recuperado de <https://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662014000200009>
- Fatecha, A. (2001). Guía para la fertilización de cultivos anuales e perennes de la región oriental del Paraguay. San Lorenzo, Paraguay : Sociedad Paraguaya de Ciencias del Suelo (SOPACIS), 37 p.
- Farias, L. N., Silva, B. E. M., Souza, W. P., Vilarinho, M. K. C., Silva, T. J. A. e Guimarães, S. L. (2013). Características morfológicas e produtivas de feijão guandu anão cultivado em solo compactado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(5), 497-503.
- Foloni, J. S. S., Calonego, J. C. e Lima, S. L. (2003). Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38, 947-953.
- González, C.O., Iglesias, C.C.E. y Herrera S., M. (2009). Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(2), 57-63.
- Jimenez, R. L., Gonçalves, W. G., Araújo Filho, J. V., Assis, R. L., Pires, F. R. e Silva, G. P. (2008). Crescimento de plantas de cobertura sob diferentes níveis de compactação em um Latossolo Vermelho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12, 116-121.
- Leonel, C. L., Freddi, O. da S., Beutler, A. N., Centurión, M. A. P. da C. e Centurión, J. F. (2007). Influência da compactação do solo no crescimento radicular e na produtividade do amendoim. *Científica, Jaboticabal*, 35(1), 51 - 60.
- Lima, L. B. de, Petter, F. A. e Wilson, M. L. (2015). Desempenho de plantas de cobertura sob níveis de compactação em Latossolo Vermelho de Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(11), 1064-1071. Recuperado de: <https://>

- [dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n11p1064-1071](https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n11p1064-1071)
- Lopes, E. S., Oliveira, D., Rodrigues, C. K. e Drinko, C.H. (2015). Compactação de um solo submetido ao tráfego do Harvester e do Forwarder na colheita de madeira. *Floresta e Ambiente*, 22(2), 223-230.
- López, O., Gonzales, E. e Molinas, A. (1995). Estudio de Reconocimiento de Suelos, Capacidad de uso de la tierra y propuesta de Ordenamiento Territorial Preliminar de la Región Oriental Del Paraguay. Asunción: Ministerio de Agricultura y Ganadería. Subsecretaria de Estado de Recursos Naturales y Medio Ambiente, 430 p.
- Materechera, S. A., Alston, A. M., Kirby, J. M. & Dexter, A.R. (1992). Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant and Soil*, 144, 297-303.
- Müller, M. M. L., Ceccon, G. e Rosolem, C.A. (2001). Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25(3), 531-8.
- Pegoraro, C. (2013). *Efeito da redução de espaçamento entre linhas para 15cm no plantio direto de soja, variedade Nidera NA5909RG, no município de Brunópolis-SC*. Universidade Federal de Santa Catarina, Curitibaanos.
- Quirijn, J van L. (Org.). (2010). Física do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 298 p.
- Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S., Reinert, D. J., Horn, R. & Håkansson, I. (2009). Reference bulk density and critical degree compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. *Soil Tillage Research*, 102, 242-254
- Reichert, J. M., Suzuki, L. E. A. S. e Reinert, D.J. (2007). Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: Ceretta, C.A., Silva, L.S. da, Reichert, J.M. (Ed.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: *Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 5, 49-134.
- Reinert, D., Albuquerque, J., Reichert, J., Aita, C. e Andrada, M. (2008). Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32(5), 1805-1816.
- Reinert, D. J., Reichert, J. M. y Silva, V.R. (2001). Propiedades físicas de solos em sistema plantio direto irrigado. In: Carlesso, R., Petry, M.T., Rosa, G.M., Ceretta, C.A., (Org.) *Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul*. Santa Maria, 1, 114-133.
- Rosim, D. C., De Maria, I. C., Silva, R. L. e Silva, Á. P. da. (2012). Compactação de um latossolo vermelho distroférico com diferentes quantidades e manejos de palha em superfície. *Bragantia*, 71(4), 502-508. Recuperado de <https://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052013005000003>
- Rossetti, K. V. e Centurión, J. F. (2015). Estoque de carbono e atributos físicos de um Latossolo em cronosequência sob diferentes manejos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(3), 252-258. Recuperado de <<http://hdl.handle.net/11449/129162>>.
- Scalone, M. (2012). Propiedades físico-químicas de los suelos. Instituto de Agrimensura. Uruguay. 43p.
- Secco, D., Reinert, D. J., Reichert, J. M. e Ros, C. O. da. (2004). Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28(5), 797-804.
- Silva, F. A. S. & Azevedo, C. A. V. (2016). The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. *African Journal of Agricultural Research* 11(39), 3733-3740. DOI: 10.5897/AJAR2016.11522
- Silva, G. J., Maia, J. C. S. e Bianchini, A. (2006). Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas a irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação em Latossolo Vermelho-escuro distrófico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30: 31-40.
- Silva, S. D., Alves, J. M., Mesquita, G. M. e Leandro, W. M. (2012). Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular do pinhão manso e crambe. *Global Science Technology*, 5(2), 87-97.
- Stancati, G., Nogueira, J. B. e Vilar, O. M. (1981). Ensaio de laboratório de mecânica dos solos. São Carlos, USP. 208p.
- Stefanoski, D. C., Santos, G. G., Marchão, R. L., Petter, F. A. y Pacheco, L. (2013). Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17(12), 1301-1309. Recuperado de <https://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013001200008>
- Suzuki, L. E. A. S., Reichert, J. M., Reinert, D. J. e Lima, C. L. R. (2007). Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 42, 1159-1167.
- Torres, J., Gutierrez, J. A. y Beltran, H. A. (2017). Compactación, una de las causas más comunes de la degradación del suelo. *Revista Ciencias Agropecuarias*, 3(3), 18- 22. Recuperado de http://revistas.electronicas.unicundi.edu.co/index.php/Ciencias_agropecuarias/article/view/208