

Artículo Original
Original Article

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO Y SU INFLUENCIA EN EL RENDIMIENTO DEL MAÍZ BAJO SIEMBRA DIRECTA

SPATIAL DISTRIBUTION OF PHYSICAL PROPERTIES OF THE SOIL AND ITS INFLUENCE ON THE YIELD OF CORN UNDER NOT TILLAGE

Derlis Enciso Santacruz

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

Orcid: <https://orcid.org/0009-0002-9014-8297>

Juan José Bonnin Acosta

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

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-7644-4730>

Rubén Franco Ibars

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

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8996-6140>

Alder Delosantos Duarte Monzón

Universidad Federal de Rio Grande del Sur, Facultad de Agronomía. Porto Alegre, Brasil

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9192-9303>

Jimmy Walter Rasche Alvarez

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

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2517-6868>

Autor correspondal: Jimmy W. Rasche: jwrasche@agr.una.py

Cómo citar este artículo:

Enciso Santacruz D, Bonnin Acosta JJ, Franco Ibars R, Duarte Monzón AD, Rasche Alvarez JW. Distribución espacial de propiedades físicas del suelo y su influencia en el rendimiento del maíz bajo siembra directa. Rev. Soc. cient. Parag. 2025;30(1): 56-69.

RESUMEN

En el sistema de siembra directa, la compactación del suelo afecta negativamente al desarrollo del sistema radicular. Para optimizar el manejo y sustentabilidad productiva del suelo es importante conocer la distribución espacial de la misma. El objetivo de esta investigación fue analizar la distribución espacial de algunas propiedades físicas de suelo y su influencia en el rendimiento de maíz bajo siembra directa. La investigación se realizó en una parcela con 31 ha, en las profundidades de 0-10; 10-20 y 20-30 cm. Los puntos de muestreo se distribuyeron en forma sistematizada, totalizando 37 puntos de muestreo. Los datos obtenidos fueron sometidos a un análisis estadístico descriptivo y análisis geoestadístico. El área de estudio presentó niveles altos de resistencia mecánica a la penetración del suelo (> 2 MPa) y densidad aparente ($> 1,5$ g.cm⁻³) en las camadas superficiales (0 a 20 cm de profundidad), baja porosidad total ($< 45\%$) y de velocidad de infiltración de agua (< 15 cm.h⁻¹), con una distribución heterogénea. El rendimiento de granos presentó en un 75% del área de estudio valores superiores a 6.500 kg ha⁻¹, observándose disminución del rendimiento de granos en áreas con limitaciones en las propiedades físicas de suelo.

Palabras claves: degradación del suelo; manejo del suelo; compactación del suelo; densidad aparente, porosidad del suelo

ABSTRACT

In no-tillage systems, soil compaction negatively affects root system development. To optimize soil management and productive sustainability, it is important to know the spatial distribution of soil compaction. The objective of this research was to analyze the spatial distribution of soil physical properties and their influence on corn yield under conservation management. The research was carried out in a 31h a plot, at depths of 0-10; 10-20 and 20-30 cm. The sampling points were distributed in a systematized way, totaling 37 sampling points. The data obtained were subjected to descriptive statistical analysis and geostatistical analysis. The study area presented high levels of mechanical resistance to soil penetration (> 2 MPa) and bulk density (> 1.5 g.cm⁻³) in the superficial layers (0 to 20 cm depth), low total porosity ($< 45\%$) and water infiltration rate (< 15 cm.h⁻¹), with a heterogeneous

distribution. Grain yields were higher than 6,500 kg ha⁻¹ in 75% of the study area, with a decrease in grain yields in areas with limited soil physical properties.

Keywords: soil degradation; soil management; soil compaction; bulk density, soil porosity

INTRODUCCIÓN

La agricultura en los últimos años ha crecido sostenidamente a fin de producir alimento para suplir las demandas a nivel del mercado local y mundial, esto trae consigo el uso intensivo y degradación de los recursos naturales, principalmente los recursos suelo-agua ⁽¹⁾. El cultivo del maíz es uno de los rubros de mayor importancia a nivel nacional, siendo el segundo en área (750.000 ha), solo superado por la soja (2), destacándose, tanto para la parte económica como en lo social, representando una fuente alimentaria bastante importante en el país. La producción del maíz al igual que la de otros cultivos, está estrechamente vinculada a la calidad del suelo, particularmente a sus propiedades físicas. En este contexto, diversos estudios han demostrado que, incluso bajo sistemas de manejo conservacionista, los atributos físicos del suelo pueden deteriorarse, lo que impacta negativamente en el rendimiento de los cultivos, incluido el maíz ^(3, 4).

La compactación es uno de los principales problemas físicos que afectan los suelos agrícolas, ya que disminuye la circulación de aire, agua y nutrientes, restringiendo el desarrollo del sistema radicular ^(4, 5). Esta condición reduce la capacidad productiva de los cultivos al generar impedimentos físicos que provocan deficiencias hídricas y nutricionales, entre otros aspectos adversos ⁽⁶⁾. En contraste, un suelo con estructura adecuada, con continuidad de poros y buena aireación, favorece al crecimiento radicular y optimiza la dinámica del agua, del aire y los nutrientes, factores fundamentales para el desarrollo de las plantas ^(7, 3).

El sistema de siembra directa (SSD) se sostiene sobre tres pilares: cobertura permanente del suelo, no revolvimiento del mismo y la rotación de cultivos; este sistema de manejo posee muchas ventajas como el aumento de la infiltración de agua en el suelo y consecuente disminución de la erosión hídrica, mejor aprovechamiento de agua por las plantas, mayor agregación del suelo, continuidad de poros, reciclaje de nutrientes, aumento del carbono orgánico y de la diversidad de organismos del suelo ⁽⁸⁾, y finalmente mayor producción ⁽⁹⁾. Sin embargo, el mal manejo de los sistemas, sin considerar los pilares citados anteriormente acarrea problemas en las fincas que realizan siembra directa, como compactación del suelo, baja tasa de infiltración, baja porosidad, control inefectivo de la erosión, acumulación de nutrientes en superficie, acidez, apareamiento de plagas y enfermedades en el suelo que atacan a los cultivos, entre otros ^(8, 10).

El manejo de suelos compactados representa un desafío, principalmente debido a los altos costos que conlleva su corrección ⁽¹¹⁾, sin embargo, una estrategia emergente para optimizar los costos de producción es el análisis de la variabilidad espacial de la compactación mediante sistemas de información geográfica (SIG), estas herramientas permiten identificar con precisión las áreas afectadas, lo que facilita la implementación de un manejo localizado para la descompactación del suelo y esta aproximación mejora la eficiencia de las intervenciones y reduce significativamente los costos asociados al manejo del suelo ⁽¹²⁾.

Teniendo en cuenta todos los problemas que genera la degradación física del suelo al sistema suelo-agua-planta, y de la posibilidad de que exista una distribución espacial de las propiedades físicas del suelo y que esta varía ampliamente en el terreno y en profundidad y que eso tiene relación negativa directa con el rendimiento del maíz bajo siembra directa, se propuso como objetivo de esta investigación analizar la distribución espacial de algunas propiedades físicas del suelo y su influencia en el rendimiento de maíz bajo siembra directa.

METODOLOGÍA

El experimento fue instalado en una propiedad de la Cooperativa Volendam Ltda., ubicada en el Distrito de San José del Rosario, al oeste del Departamento de San Pedro (Latitud: 24°13'34,1" S; Longitud: 56°57'9,6" O y Altitud: 83 msnm). El clima de la zona se caracteriza por ser predominantemente lluvioso y húmedo (Subtropical), con una temperatura media de 24°C, siendo la máxima de promedio de 35°C y la mínima de 10°C; la precipitación media anual

es de 1.200 mm⁽¹³⁾. En 2018, año en que se llevó a cabo la investigación, la precipitación total registrada fue de 1.393 mm, con un promedio mensual de 116 mm. Este valor superó en 193 mm el promedio histórico anual de la región (1.200 mm año⁻¹). Durante el período de recolección de datos en campo (enero a junio de 2018), enero registró el mayor índice mensual (227 mm), mientras que abril fue el mes más seco, con Solo 7 mm de lluvia (Figura 1).

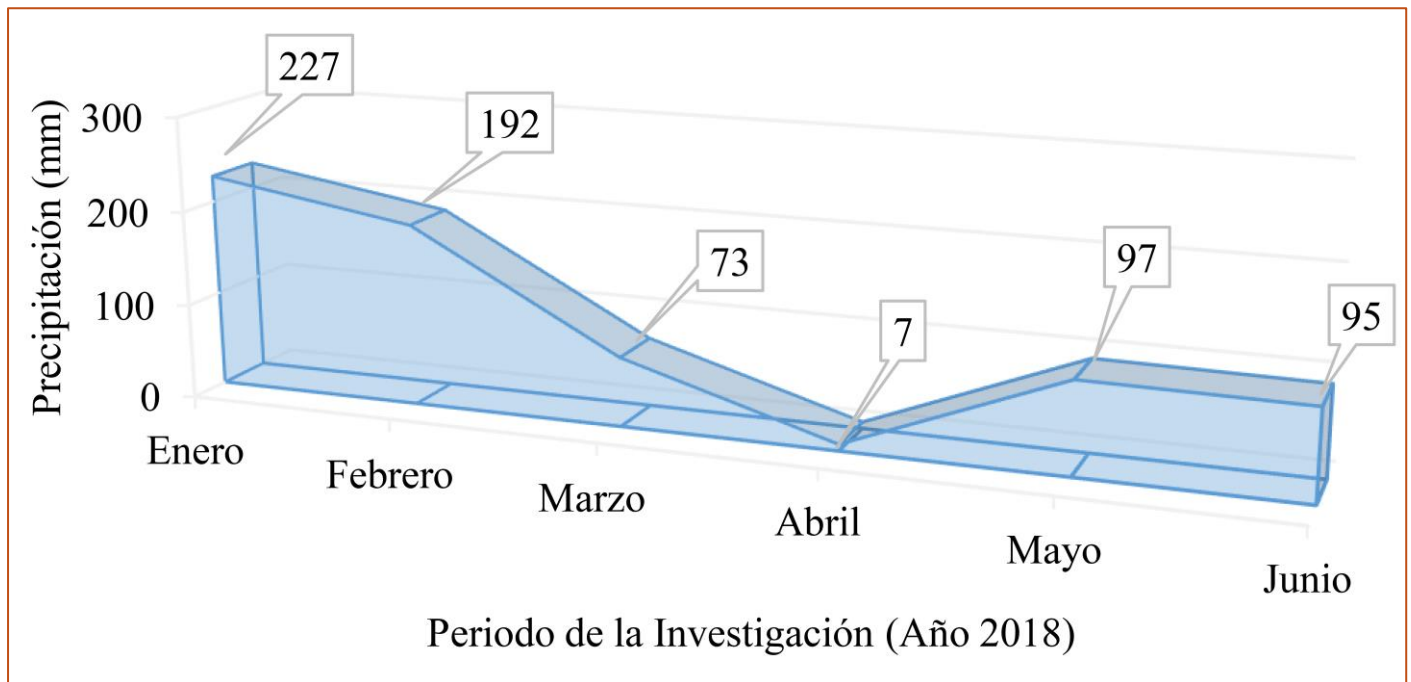


Figura 1. Datos de precipitación mensual registrada en el Distrito de Villa del Rosario, Dpto. San Pedro, durante el periodo de investigación (enero 2018 a junio 2018), proveído por la Cooperativa Volendam. Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

La investigación se llevó a cabo en una parcela de 31 ha bajo siembra directa, sistema utilizado durante los últimos veinte años. El esquema de cultivo consiste en soja durante el verano, seguido de maíz zafriña en otoño (maíz solo o asociado con braquiaria), manteniendo el suelo siempre cubierto y en producción. Durante el período de estudio, el maíz se sembró en la segunda quincena de enero de forma mecanizada, utilizando el híbrido MAZPAR MP 826, seleccionado por su alta adaptabilidad a las condiciones edafológicas y climáticas de la región. La siembra se realizó con un espaciamiento de 0,45 m entre hileras y 0,40 m entre plantas, alcanzando una población promedio de aproximadamente 55.000 plantas.ha⁻¹. El manejo nutricional y sanitario se llevó a cabo según el plan de manejo establecido por la Cooperativa Ltda. La fertilización base se aplicó al momento de la siembra con 150 kg.ha⁻¹ de la fórmula 8-25-20 de N-P₂O₅-K₂O, seguida de una fertilización en cobertura de 100 kg.ha⁻¹ con urea (46-00-00) a los 45 días después de la siembra.

En el área del experimento predomina suelos clasificados como Arenic Paleudult, con textura arenosa de origen arenisca, que se caracteriza por tener un alto índice de infiltración, poca acumulación de materia orgánica y con nivel de fertilidad natural media⁽¹⁴⁾.

Antes de iniciar la determinación de las variables de estudio, se llevó a cabo la vectorización del área experimental (31 ha) mediante un receptor GNSS Trimble® Juno 3B, con el cual se marcaron los vértices del área de estudio. Posteriormente, se diseñó una malla de muestreo con un esquema de grilla sistemática, método ampliamente utilizado en estudios de suelo debido a su capacidad para minimizar desajustes en la distribución de los puntos de muestreo y reducir las dificultades en la interpolación⁽¹⁵⁾.

La malla consistió en una cuadrícula georreferenciada con 37 puntos de muestreo. De estos, 31 fueron ubicados en una disposición equidistante de 100 m × 100 m, mientras que los 7 restantes se distribuyeron en posiciones intermedias para cubrir zonas que visualmente estaban con alta variabilidad espacial; esta distancia de muestreo se definió con base a un estudio previo, lo cual evidencia una autocorrelación espacial de moderada a alta en las

propiedades físicas del suelo, mostrando que dentro de una radio de 1000 m estas características son similares ⁽¹⁶⁾. En función de estos resultados, se recomienda una densidad de muestreo de aproximadamente 1 punto por hectárea para optimizar el uso de recursos.

La determinación de la localización y distribución geográfica de todos los puntos de muestreo a nivel de campo se realizó por medio del programa informático GPS TrackMaker PRO y cada punto de muestreo fue localizado con la ayuda de un receptor tipo GPS Trimble Juno 3B. La georreferenciación de cada punto de muestreo permitió generar un mapa de variabilidad o distribución espacial de los valores obtenidos en cada variable, en programas específicos para el gerenciamiento de datos especializados en SIG.

Las variables evaluadas fueron resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS), densidad aparente (DAP), humedad gravimétrica (Hg) y porosidad total (PT), medidas en tres profundidades del perfil del suelo (0-10, 10-20 y 20-30 cm). Además, se evaluó la velocidad de infiltración del agua (VIA) y el rendimiento de granos de maíz (RG).

Para la medición de la RMPS, se utilizó un penetrómetro electrónico de accionamiento manual (Eijkelkamp®, modelo Pentrologger 06.15.AS). Este equipo cuenta con un sistema de adquisición y procesamiento automático de datos georreferenciados, registrando en tiempo real los valores de resistencia en formato gráfico y numérico. Las mediciones se realizaron hasta los 30 cm de profundidad o hasta donde las condiciones del suelo lo permitieron. Los resultados de RMPS fueron expresados en MPa para cada camada de 10 cm de profundidad.

La determinación de la DAP se realizó tomando muestras de suelos en cilindros de aceros con un volumen definido (cm^3), de los puntos de muestreos establecidos y georeferenciados previamente, los resultados fueron expresados en g.cm^{-3} . Las muestras de suelo fueron colocadas en estufa por 48 horas a 105 °C, y luego se pesaron las muestras secas y expresadas en gramos (g). Teniendo todos los datos se calculó el valor de la DAP utilizando la siguiente ecuación matemática (1) ⁽¹⁷⁾:

$$\text{DAP} = \text{peso seco (g)} / \text{volumen total (cm}^3\text{)} \quad (1)$$

Para la determinación del porcentaje de porosidad total (PT), se aplicó la siguiente ecuación matemática (2) ⁽¹⁷⁾:

$$\text{PT} = (1 - (\text{DAP} / \text{Dreal})) \times 100 \quad (2)$$

Donde DAP corresponde a los valores de densidad aparente (g.m^{-3}), y Dreal (Densidad real), corresponde a un valor constante de $2,65 \text{ g.m}^{-3}$. Los valores obtenidos se multiplicaron por 100 para expresarlos en porcentaje (%).

La Hg fue determinada utilizando las mismas muestras tomadas para la determinación de DAP y PT de las tres profundidades (10, 20 y 30 cm). Las muestras de suelo fueron pesadas en estado húmedo y luego secadas en estufa durante 48 horas, a 105 °C. Posteriormente, se realizó un segundo pesaje para obtener el valor del peso seco de las muestras. Obtenido los datos de peso húmedo (PH) y peso seco (PS), se calculó la Hg aplicando la siguiente ecuación matemática (3) ⁽¹⁷⁾:

$$\text{Hg} = ((\text{PH}-\text{PS})/\text{PS}) \times 100 \quad (3)$$

Donde Hg corresponde a los valores de humedad gravimétrica suelo (%), y PH: peso húmedo en gramos (g); PS: peso seco (g).

Para la determinación de la VIA, se utilizó un anillo de 6 pulgadas de diámetro (15 cm), el cual fue insertado a una profundidad de 2,5 cm en el suelo. Para evitar la alteración de la superficie del suelo al agregar el agua, tanto el anillo como el área de suelo contenido dentro de él, fueron cubiertos con una lámina de plástico. A continuación, se añadieron 444 mL de agua, equivalente a una columna de 2,5 cm de agua). Posteriormente se retiró la lámina plástica y se midió con un cronómetro el tiempo que tardó en infiltrar toda el agua (444 mL). El tiempo registrado (en minutos) se utilizó para calcular la tasa de infiltración aplicando la ecuación propuesta por el USDA (4) ⁽¹⁸⁾:

$$VIA = (H/t)/60 \quad (4)$$

Donde H altura de la lámina de agua (mm); t es el tiempo en que tarda en infiltrar el agua (min) y 60 es para expresar los resultados en horas.

Finalmente, para la variable de rendimiento de grano (RG), se procedió a la cosecha manual del maíz, registrando el peso con un contenido de humedad del 14% ⁽¹⁹⁾. En este caso, se midió un área de 2 m² en cada punto de muestreo, y el peso obtenido se extrapola a hectárea (ha), expresando los resultados en kg.ha⁻¹.

Los datos obtenidos para cada variable fueron sometidos inicialmente a un análisis exploratorio mediante estadística descriptiva., con la finalidad de describir los parámetros estadísticos, se analizaron las medidas de posición (media, mediana, mínimo y máximo) y la distribución de los datos a través del coeficiente de variación (CV), asimetría y curtosis. Este análisis permitió evaluar la tendencia central, dispersión y distribución de los datos, verificando su homogeneidad y normalidad. Se consideró que las observaciones eran espacialmente independientes, considerando que las variaciones entre puntos de estudio ocurrían de manera aleatoria sin relación con su posición, además, se buscó identificar discrepancias entre los valores mínimo y máximo y determinar si la distribución de los datos era normal, asumiendo que valores de asimetría y curtosis cercanas a cero indican una aproximación a la normalidad ⁽²⁰⁾.

En los casos donde los datos no presentan distribución normal y/o homogeneidad, se aplicarán técnicas estadísticas para su ajuste, en la medida de lo posible, buscando obtener una distribución normal y homogénea. La evaluación de los coeficientes de asimetría y curtosis se realizó con base en los criterios de Dikovskiy ⁽²¹⁾, mientras que la variabilidad de los datos se analizó según el coeficiente de variación (CV), siguiendo la clasificación de Warrick y Nielsen ⁽²²⁾, que consideran: variabilidad baja (CV<12%); media (12%<CV<60%) y alta (CV>60%). De acuerdo con los mismos autores, algunos atributos del suelo pueden presentar coeficiente de variación entre 10 y 100%. Según Landim ⁽²³⁾, el coeficiente de variación nos da una medida relativa de la precisión del experimento, siendo útil en la evaluación de dispersión de datos. Para el análisis estadístico fue utilizado el programa estadístico InfoStat.

Posteriormente, se realizó un análisis de correlación entre los valores de los parámetros físicos del suelo estudiados (RMPS, DAp, PT, Hg y VIA) y el RG. La interpretación de los coeficientes de calificación (r) se realizó con base en Kitamura ⁽²⁴⁾, estableciendo las siguientes categorías: extra alta (0,80 ≤ r ≤ 1,0 o -0,80 ≤ r ≤ -1,0), alta (0,60 ≤ r < 0,80 o -0,60 ≥ r > -0,80), moderada (0,40 ≤ r < 0,60 o -0,40 ≥ r > -0,60), baja (0,20 ≤ r < 0,40 o -0,20 ≥ r > -0,40) y nula (0,00 ≤ r < 0,20 o -0,00 ≥ r > -0,20). El mismo autor considera que una valoración lineal fuerte entre dos variables debe presentar un coeficiente superior a +0,60 (positivo) o inferior a -0,60 (negativo).

Tras los ajustes necesarios para normalizar los datos, se realizó un análisis geoestadístico utilizando el software GS+ Geostatistics (Gamma Design Software). Se consideraron los vecinos más próximos con sus respectivas coordenadas georreferenciadas para la construcción de los semivariogramas y la identificación de los modelos teóricos que mejor describían el fenómeno en el área de estudio. La dependencia espacial fue evaluada mediante los ajustes de semivariogramas y clasificada según Cambardella et al. ⁽²⁵⁾, quienes establecieron que cuando el valor porcentual de la semivarianza es inferior al 25%, la dependencia espacial es alta; entre 25% y 75%, medios; y superior al 75%, baja.

Finalmente fueron contruidos los mapas temáticos según Vieira ⁽²⁰⁾, de aquellas variables que presentan variabilidad especial, a través de la interpolación por krigagen y aquellos que no presentaban variabilidad espacial (efecto pepita puro), por el método de interpolación inversa a la distancia.

RESULTADOS y DISCUSIÓN

Estadística descriptiva de las variables físicas del suelo

El análisis estadístico descriptivo de las variables evaluadas muestra valores similares entre la media y la mediana para cada una de las propiedades físicas del suelo a diferentes profundidades (Tabla 1). Además, los bajos valores de asimetría y curtosis, incluido los datos del rendimiento de granos, indican que los datos siguen una distribución normal,

dado que los valores de asimetría están próximos a cero. Se encontró que el 52% de los datos presentaron asimetría positiva, mientras que el 48% exhibieron asimetría negativa, lo que indica que la mayoría de los valores analizados tendieron a centrarse por debajo del promedio de las variables estudiadas. La interpretación de estos resultados se realizó siguiendo los criterios estadísticos propuestos por Dicoyskiy ⁽²¹⁾.

Profundidad (cm)	Media	Mínimo	Máximo	Mediana	CV*(%)	Curtosis	Asimetría
Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (MPa)							
0-10	1,41	0,50	2,50	1,30	37,42	-0,66	0,46
10-20	1,86	0,30	4,30	1,75	39,39	2,24	1,03
20-30	1,52	0,10	2,30	1,50	27,30	-0,60	2,09
Densidad aparente del suelo (Dap) (g.cm⁻³)							
0-10	1,55	1,20	1,70	1,60	5,82	4,15	-1,80
10-20	1,56	1,40	1,70	1,60	4,92	-0,28	-0,24
20-30	1,46	1,20	1,70	1,50	6,94	0,25	-0,10
Porosidad (PT) (%)							
0-10	41,76	35,00	56,00	41,00	7,87	7,89	2,22
10-20	41,49	36,00	48,00	41,00	6,27	0,09	0,28
20-30	45,14	36,00	54,00	45,00	8,57	0,02	-0,11
Humedad gravimétrica (Hg) (%)							
0-10	9,74	5,60	13,50	9,80	15,49	1,39	-0,02
10-20	9,58	5,30	12,90	9,70	15,42	0,98	-0,62
20-30	8,58	5,50	13,00	8,40	20,84	-0,41	0,31
Velocidad infiltración del agua (VIA) (cm h⁻¹)							
.....	8,86	5,20	15,30	8,50	37,22	-0,53	0,76
Redimiendo de Granos (RG) (kg ha⁻¹)							
.....	6.902	5.670	8.438		9,35	-0,18	0,26

Tabla 1. Parámetros estadísticos de la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS); densidad aparente del suelo (Dap); porosidad total del suelo (PT); humedad gravimétrica (Hg); en las profundidades de 0-10, 10-20 y 20-30 cm, respectivamente Velocidad de infiltración del agua (VIA) y rendimiento de Granos (RG). Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

El análisis de los valores de curtosis indicó que el 48% de los datos presentaron curtosis negativa, lo que sugiere una distribución mesocúrtica, caracterizada por una mayor variabilidad en torno a la media y una curva relativamente plana. En contraste, el 52% de los datos exhibieron curtosis positiva, indicando una distribución leptocúrtica, donde los valores tienden a estar más concentrados alrededor de la media, formando una curva más puntiaguda ⁽²¹⁾. En cuanto al coeficiente de variación (CV), las variables RMPS, Hg, y VIA, presentan una variabilidad media en todas las profundidades evaluadas ($12\% \leq CV < 60\%$). Por otro lado, las variables PT, Dap (en todas las profundidades evaluadas) y RG, presentan CV bajo ($CV < 12\%$) (Tabla 1), de acuerdo a los parámetros establecidos por Warrick & Nielsen ⁽²²⁾. La mayor variabilidad observada en los parámetros evaluados dentro del área experimental puede atribuirse a las actividades antrópicas, principalmente al tránsito no controlado de maquinarias agrícolas para el manejo agronómico del cultivo, como observado en experimentos ⁽²⁶⁾.

Los valores medios de la RMPS muestran que en la camada de 0-10 cm del área experimental presenta un promedio de 1,41 MPa. En la camada inferior (10-20 cm), estos valores fueron aumentando hasta un valor promedio de 1,86 MPa, mientras en la profundidad de 20-30 cm, los valores de RMPS, disminuyeron nuevamente a un promedio 1,52 MPa (Tabla 1). En base a estos resultados se puede establecer que, en el área de estudio, la RMPS, fue aumentando 1,2 MPa hasta los 20 cm de profundidad, y posteriormente estos valores fueron bajando. Sin embargo, se observa que en todas las profundidades evaluadas se registran valores de RMPS que están por encima de 2 MPa, cuyos valores representan a suelos compactados, de acuerdo con lo establecido por Klein ⁽¹⁷⁾, quien, en base a varias investigaciones, afirma que los niveles de RMPS a partir de los 2 MPa, presentan condiciones de compactación, dificultado el desarrollo del sistema radicular de las plantas. De manera similar, el USDA ⁽²⁷⁾, establece que los valores > 2 MPa, son considerados altos y por lo tanto; son suelos compactados.

Los niveles de RMPS observados en las capas superficiales en este estudio pueden estar relacionados con el sistema de manejo del suelo, particularmente con la siembra directa. Esta práctica de no remover el suelo promueve la acumulación de materia orgánica, lo que favorece la agregación de partículas del suelo en la camada de 0-10, En la camada superficial también se incrementa la cantidad de poros, mejorando tanto la estructura del suelo como su funcionalidad ⁽¹¹⁾. Además, el aumento en la continuidad de los poros, en comparación con suelos que han sido removidos, contribuye a una mayor capacidad de circulación de agua y aire, favoreciendo el desarrollo del sistema radicular ^(28, 29). Dando como resultado menor densidad en la camada superficial que en la camada de 10 a 20 cm como observado por Gomez et al ⁽³⁰⁾ en una pastura natural.

En relación con la DAp también se observa el mismo comportamiento, es decir, con valores altos hasta los 20 cm de profundidad, alcanzando un promedio de $1,5 \text{ g cm}^{-3}$. Según los criterios establecidos por el USDA ⁽¹⁸⁾, en suelos de textura arenosa, valores de $\text{DAp} \geq 1,5 \text{ g cm}^{-3}$. puede restringir el desarrollo del sistema radicular debido a la compactación del suelo. Sin embargo, a los 30 cm de profundidad, los valores promedio de DAp disminuyeron a $1,4 \text{ g cm}^{-3}$, lo que se demostró un nivel adecuado para suelos arenosos, permitiendo un mejor desarrollo del sistema radicular.

El comportamiento observado de la DAp también puede estar relacionado con el sistema de manejo del suelo, específicamente la siembra directa. Balbuena et al. ⁽³¹⁾ estudiaron la RMPS y la DAp en suelos manejados bajo siembra directa con diferentes números de pasadas de maquinaria agrícola y observaron que, observaron que a medida que se aumenta el número de pasadas de maquinarias también aumentan los valores de RMPS y DAp, principalmente en la camada superficial. Además, concluyeron que el sistema de siembra directa no es capaz de limitar el nivel de compactación cuando el tránsito de maquinarias es elevado, lo que afecta la estructura del suelo. Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en este estudio, se puede establecer que el sistema de manejo es un factor determinante en el comportamiento de estas variables físicas. En la siembra directa, la ausencia de remoción del suelo puede favorecer la compactación, principalmente en la capa subsuperficial (10- 20 cm), donde se registraron altos valores de DAp y RMPS, así como una reducción en la porosidad total, especialmente en los macroporos ⁽³²⁾. Es común observar aumento de la densidad aparente en sistemas de labranza conservadora, principalmente en la camada de 10 a 20 cm, cuando comparado con la labranza convencional, este efecto no siempre resulta perjudicial para el desarrollo del cultivo. Esto se debe a que el sistema de siembra directa ofrece otros beneficios como la continuidad de poros, reducción de la erosión por la cobertura, el incremento del tenor de materia orgánica, aumento de la disponibilidad de nutrientes, etc., lo que puede compensar los efectos de la compactación ^(28, 33, 34).

En esta investigación se observó que la PT, presenta un comportamiento inverso a la RMPS y DAp. Hasta los 20 cm de profundidad los valores promedio de PT fueron bajos (41%) para un suelo arenoso mientras que, a los 30 cm de profundidad, la porosidad aumentó a un promedio de 45%, considerados niveles ideales para este tipo de suelo ⁽¹⁸⁾. Estos resultados, puede atribuirse a la alteración física presentada en las camadas superficiales, producto de la compactación causada por el tránsito de maquinarias agrícolas. El tránsito excesivo modifica el tamaño y estabilidad de los agregados, lo que incrementa la densidad del suelo y la RMPS, reduciendo la cantidad de poros disponibles para la translocación de aire y agua en el perfil del suelo ⁽³⁵⁾, principalmente en la cabecera de los lotes donde hay mayor tráfico de máquinas ⁽³⁶⁾.

En cuanto al contenido de humedad gravimétrica, los primeros 20 cm de profundidad presentaron valores más altos en comparación con la capa de 20 a 30 cm. En promedio, se registraron valores de 9,7% y 9,5% a 10 y 20 cm de profundidad, respectivamente, mientras que a los 30 cm se redujo a 8,5%, indicando una mayor acumulación de humedad en la capa superficial. Este comportamiento puede estar influenciado por la evaporación del agua en el suelo, donde la humedad tiende a ascender hacia las capas más superficiales debido a gradientes térmicos cuando el suelo se encuentra seco ⁽³⁷⁾. Además, es importante considerar que el muestreo de suelo fue realizado el 5 de mayo de 2018, 5 días después de una precipitación baja (5 mm). Esta precipitación se produjo tras un periodo seco de 18 días, desde última precipitación registrada en la zona (15 de abril de 2018). En un suelo con bajo contenido de humedad, esta precipitación reducida probablemente solo logró infiltrarse y almacenarse con mayor intensidad en los primeros 20 cm de profundidad.

Por otra parte, la VIA registrada en el área de estudio, fue bastante baja, en promedio $8,86 \text{ cm.h}^{-1}$. Según Brouwer et al. (1988) citado por ⁽³⁸⁾, en un suelo de textura arenosa, la VIA debería estar próximo a los 30 cm.h^{-1} , lo que indica una reducción significativa en la capacidad de infiltración del suelo evaluado. La baja VIA en el suelo puede deberse a las condiciones físicas del suelo registradas en la parte superficial de la misma, niveles altos de DAp, bajos contenidos de PT, entre otros factores ⁽³⁹⁾. En este sentido, es importante mencionar que la baja infiltración de agua en el suelo aumenta la escorrentía superficial, lo que puede desplazar partículas del suelo, provocando erosión hídrica, arrastrando nutrientes y materia orgánica, que se concentran en los primeros centímetros del perfil del suelo, afectando la fertilidad del suelo ⁽⁴⁰⁾. Con la baja infiltración también disminuye la acumulación de contenido de agua en el perfil del suelo y esto finalmente se traduce en un bajo rendimiento del cultivo ⁽³⁹⁾.

El rendimiento de granos del maíz, en promedio alcanzó 6.902 kg.ha^{-1} , superando de esta manera el rendimiento promedio nacional, registrado en el año 2018, que fue de 5.526 kg.ha^{-1} ⁽⁴¹⁾. Es común observar que en siembra directa se obtenga mayor rendimiento de granos en comparación a un sistema convencional, esto se debe principalmente a que en un sistema de siembra directa se mejoran las condiciones del sistema edáfico como la retención de agua, disponibilidad de nutrientes, etc. Por tal motivo, se puede establecer que el manejo del suelo, de alguna manera puede contrarrestar, en los resultados promedios del rendimiento de granos del maíz, los efectos negativos que puedan causar las degradaciones físicas del suelo, es decir, niveles altos de RMPS y DAp.

Correlación entre el rendimiento de granos de maíz y las variables físicas del suelo

El rendimiento de granos presenta una correlación baja o nula con las variables físicas del suelo (RMPS, DAp, PT, Hg y VIA) en todas las profundidades analizadas (Tabla 2). Aunque exista baja correlación, se observa suelos con valores altos de RMPS y DAp, afectan negativamente el buen desarrollo de sistema radicular de los cultivos (4), y por consiguiente, la asimilación óptima de nutrientes ⁽³⁹⁾ y aguas que se encuentran disponibles en el suelo ⁽²⁴⁾.

Rendimiento de granos (RG) (kg.ha^{-1})	Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (MPa)	Densidad aparente del suelo (DAp) (g.cm^{-3})	Porosidad total del suelo (PT) (%)	Contenido de humedad en el suelo (Hg) (%)	Velocidad de infiltración del agua (VIA) (cm.h^{-1})
	PROFUNDIDAD DE 0 a 10 cm				
	-0,12	-0,22	0,14	0,15	0,28
	PROFUNDIDAD DE 10 a 20 cm				
	-0,06	-0,14	0,29	0,12	
	PROFUNDIDAD DE 20 a 30 cm				
	-0,04	-0,29	0,25	0,43	

Tabla 2. Correlación de Pearson entre las variables de Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS), densidad aparente del suelo (DAp), porosidad total del suelo (PT), contenido de humedad (Hg), velocidad de infiltración del agua (VIA) con el rendimiento de granos de maíz (RG).

En relación a las variables de PT, Hg y VIA, aunque los valores son bajos o nulos, presentan una correlación positiva en todas las profundidades evaluadas. Es decir, a medida que los valores de PT, Hg y VIA aumentan, también los valores de RG tienden a aumentar. Esto puede justificarse por el hecho de que un suelo con mayor contenido de PT favorece el flujo de nutrientes y agua, lo que incrementa su disponibilidad para las plantas ⁽⁴²⁾. En consecuencia, el cultivo de maíz puede optimizar su nutrición, y expresar más eficientemente su potencial productivo en suelos con menor impedimento físico ⁽⁹⁾.

Análisis geoestadístico de las variables físicas del suelo

Una vez realizado los ajustes necesarios para lograr una distribución normal de los datos, se confeccionaron los semivariogramas para las variables analizadas. Esto permitió determinar los parámetros de alcance (Ao), que representan el límite de distancia de dependencia espacial y la dependencia espacial $[C/(C+0)]$, que indica qué proporción de la variación total de los datos es explicada por la continuidad espacial (Tabla 3).

Profundidad (cm)	Modelo	Efecto pepita (Co)	Meseta C1 + Co	Alcance Ao (m)	Co/C1 + Co (%)	Dependencia Espacial
Resistencia Mecánica a la Penetración del Suelo (RMPS)						
0-10	Lineal	0,30416	0,3044	724	99,92	Baja
10-20	Esférico	0,0001	0,1962	143	0,05	Alta
20-30	Lineal	0,13352	0,13352	725	100	Baja
Densidad Aparente del suelo (DAP)						
0-10	Esférico	0.00001	0,00822	190	0,12	Alta
10-20	Exponencial	0,00059	0,00878	336	6,72	Alta
20-30	Esférico	0,00001	0,01062	213	0,09	Alta
Porosidad Total (PT) (%)						
0-10	Esférico	0,01	11,46	276	0,09	Alta
10-20	Esférico	2,08	14,6	1.464	14,25	Alta
20-30	Esférico	0,01	15,39	209	0,06	Alta
Humedad gravimétrica (Hg)						
0-10	Esférico	0,001	2,343	192	0,04	Alta
10-20	Esférico	0,001	2,309	233	0,04	Alta
20-30	Lineal	3,47036	3,47037	725	100	Baja
Velocidad Infiltración del agua (VIA)						
	Lineal	3,14	3,14	725	100	Baja
Redimiendo de granos (RG) (kg.ha⁻¹)						
	Esférico	123.000	850.200	1.437	14,47	Alta

Tabla 3. Parámetros de los modelos de semivariogramas para la Resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS); Densidad Aparente del suelo (DAP); Porosidad total del suelo (PT); Contenido de humedad (Hg) en las profundidades estudiadas; Velocidad de infiltración del agua (VIA), y Rendimiento de Granos (RG). Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

En base a los parámetros establecidos por Cambarella *et al.* ⁽²⁵⁾ y los resultados obtenidos en el análisis geoestadístico, se puede afirmar que para las variables RMPS (0-10 cm y de 20-30 cm), Hg (20-30 cm) y la VIA presentaron una dependencia espacial baja entre los valores vecinos (efecto pepita puro). Estas observaciones pueden deberse a las técnicas de muestreo adoptados (distancia de muestreo), lo cual no permitió detectar dependencia espacial para estas variables ⁽²⁰⁾. Por lo tanto, el estudio de este tipo de variabilidad (aleatoria), se adopta las herramientas de la estadística clásica y estos grupos de datos fueron interpolados por el método de inversa a la distancia. Para las demás variables y profundidades estudiadas se observaron modelos exponenciales y esféricos, demostrando que los valores vecinos tienen dependencias espaciales altas, pudiendo aplicar geoestadística sobre dichos valores y permitió aplicar una interpolación por el método de *Krigagem*, a fin de estimar los valores de las propiedades estudiadas para localidades donde no fueron evaluadas ⁽²⁰⁾.

Mapas de distribución espacial de las propiedades físicas del suelo

En base al análisis de los parámetros de los modelos de semivariogramas se establecieron los métodos de interpolación a cada variable para la elaboración de mapas de distribución espacial de RMPS, DAP, PT, Hg, VIA y RG, cuyas informaciones se pueden analizar visualmente en las Figura 1.

En el mapa de distribución espacial de la RMPS (Figura 2a), se observa que en la primera camada evaluada (0-10 cm), el 85% del área de estudio (26 ha), no presenta niveles de compactación y solo el 15% (5 ha), presenta niveles de compactación (RMPS > 2 MPa) ⁽¹⁷⁾. En la camada de 10-20 cm, se observa un aumento de los niveles de RMPS, donde el área compactada asciende a 33% (8 ha), registrando valores máximos de RMPS > 3,5 MPa, donde la distribución espacial de las zonas compactadas se presenta de manera aleatoria dentro del área de estudio. En la camada de 20-30 cm de profundidad, nuevamente los niveles de RMPS fueron bajando, donde 90% del área experimental (28 ha) presenta niveles no compactados (RMPS < 2 MPa), y sólo un total de 3 ha presenta niveles compactados (RMPS > 2MPa), también con una distribución espacial aleatoria dentro del área experimental. Este comportamiento de la

variabilidad espacial puede deberse al tránsito no controlado de maquinarias durante todo el ciclo de las producciones agrícolas establecidas en el área de estudio ⁽³⁶⁾.

Tolón-Becerra et al. ⁽⁴⁴⁾ sugieren que cuando hay valores de RMPS superiores a 1,7 MPa, ya se observa efecto negativo en las condiciones para la emergencia del maíz y, reduce el rendimiento del cultivo en hasta 15,2%. Villazón-Gómez et al. ⁽¹²⁾ observaron que en sistema convencional al remover el suelo se descompacta el mismo de manera provisoria, pero a mayor profundidad se agrava el problema de compactación formando el pie de arado con RMPS superior a 3 MPa. Colmán et al. ⁽⁴⁵⁾ sostienen que la RMPS es el mejor indicador para el crecimiento de las raíces de las plantas, ya que considera tanto de la densidad aparente como de la humedad en el suelo.

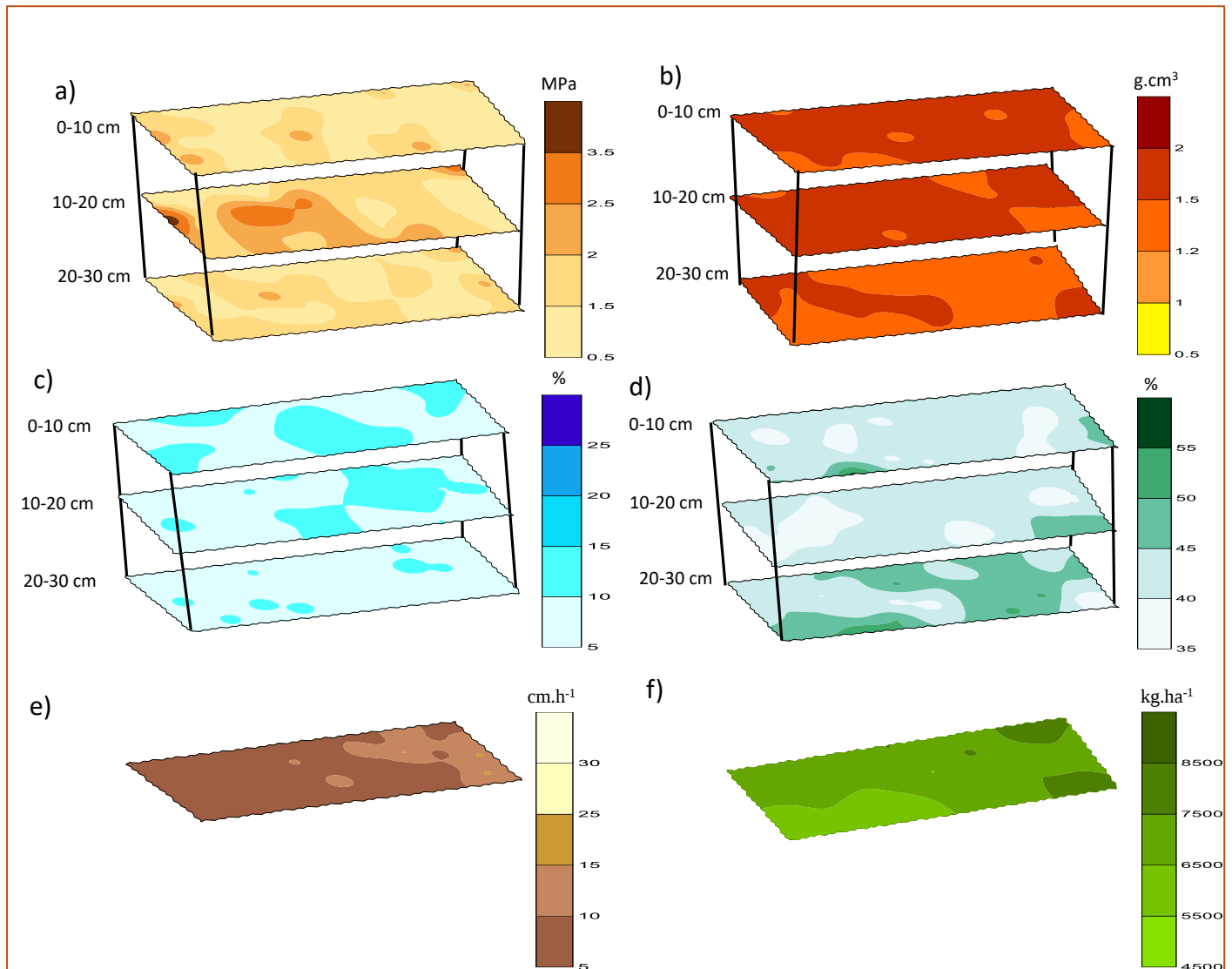


Figura 2. a) Mapa de distribución espacial de la a) resistencia mecánica a la penetración del suelo (RMPS) (MPa), b) Densidad Aparente del suelo (DAP) (g.cm^{-3}) c) Porosidad total del suelo (PT) (%), d) Humedad gravimétrica (Hg) (%), e) Velocidad de infiltración del agua en el suelo (VIA) (cm.h^{-1}), y f) Rendimiento de granos (RG) del maíz (kg.ha^{-1}) Departamento de San Pedro, Paraguay, 2018.

La distribución espacial de la DAp del suelo (Figura 2b) se comporta de la misma manera que la RMPS, es decir, hasta los 10 cm el área de estudio presenta la mayor parte niveles altos de DAp, superado el nivel ideal ($> 1,4 \text{ g.cm}^{-3}$), que pueden ser considerados áreas compactadas, en base a los parámetros establecidos por USDA ⁽¹⁸⁾, para suelos con textura arenosa. En la camada de 10 a 20 cm de profundidad, se presenta un total de 25 ha (81%), con DAp que se

encuentra entre $1,5 \text{ g.cm}^{-3}$ y 2 g.cm^{-3} . Sin embargo, en la camada inferior (20 a 30 cm de profundidad), la mayor parte del área (73%), presenta una DAp por debajo de $1,4 \text{ g.cm}^{-3}$.

Por otro lado, la PT del suelo (Figura 2c), en la primera camada evaluada (0-10 cm), el 84% del área de estudio (26 ha), presenta un nivel por debajo de lo ideal para un suelo arenoso ($PT < 45\%$) ⁽¹⁸⁾. En la camada de 10- 20 cm el bajo contenido de poros del suelo se acentúa más, donde se observa que el 89% del área de estudio presenta niveles por debajo del contenido ideal de poros, y solo 3 ha (11%), presenta niveles ideales de contenido de poros ($PT > 45\%$). Sin embargo, a los 20-30 cm de profundidad, se observa que la mayor parte del área experimental (55%) presenta contenidos ideales de poros ($PT > 45\%$). Por lo tanto, para esta variable se puede establecer que, hasta los 20 cm de profundidad el suelo presenta alteraciones significativas en cuanto al contenido de poros lo cual guarda una relación inversamente proporcional con los niveles de RMPS observadas en el área de estudio, es decir, en las con registro de mayor RMPS, se observa menor PT. El bajo nivel de poros del suelo en estas camadas puede deberse a la compactación del suelo, tal como lo establece Klein ⁽¹⁷⁾, que a medida que aumenta la compactación se reduce los espacios porosos del suelo.

En el mapa de distribución espacial de la Hg (Figura 2d), se puede observar que en la primera camada evaluada (0 a 10 cm), la mayor parte (57%) del área experimental, presenta una Hg por debajo de los 10%. En la camada de 10 a 20 cm), el 59 % del área presenta Hg por debajo de los 10%, y en la camada de 20 a 30 cm, se observa que la Hg en el 78% del área presenta Hg por debajo de los 10%. Indicando de esta manera una tendencia a disminuir la Hg a mayor profundidad. El comportamiento de la Hg en el suelo puede deberse a varios factores, por ejemplo, al factor atmosférico (lluvia, evaporación, temperatura, viento, humedad relativa, radiación solar, etc), a las condiciones del suelo (manejo, textura, contenido de materia orgánica, cobertura vegetal, etc.), los cuales hicieron posible el ascenso del agua hacia las camadas superficiales del suelo ⁽³⁷⁾. Por otro lado, Matisso *et al.* ⁽⁴⁶⁾ evaluaron la retención del agua en el suelo y el rendimiento de maíz en diferentes manejos de suelo, y constataron que el sistema de siembra directa tiene mayor capacidad de retención de agua y posee menor valor de agua higroscópica, este último no se encuentra disponible para las plantas y por lo tanto no afecta el rendimiento del maíz.

En el mapa de distribución espacial de la VIA (Figura 2e), se observa una VIA muy por debajo de los valores ideales establecidos para un suelo arenoso (25 cm.h^{-1}) ⁽¹⁸⁾, donde el 76 % del área experimental (24 ha), presenta una VIA por debajo de 10 cm.h^{-1} . El 24% (7 ha), presenta una VIA por encima de 10 cm.h^{-1} , y de esto solamente 3,4 ha (11%), registra una VIA que llega a los 15 cm.h^{-1} . De esta manera se establece en este estudio que la VIA presenta condiciones desfavorables para el desarrollo normal de los cultivos. Las condiciones de VIA registradas en el área de estudio, puede justificarse de manera directa con los niveles altos de DAp y RMPS, y el bajo contenido de poros del suelo presentado en la camada superficial (0-20 cm de profundidad).

En el mapa de RG de maíz (Figura 2f), se puede observar que la distribución espacial de la misma se presenta de manera homogénea, siendo el rendimiento promedio de 6.902 kg.ha^{-1} . Sin embargo, analizando de manera más precisa la variación a nivel espacial, se puede observar que el 74% del área de estudio (25 ha), presentó RG superior a 6.500 kg.ha^{-1} y solo el 26% (8 ha), presentó rendimientos por debajo del rendimiento promedio.

Comparando los mapas de distribución espacial de RMPS y PT con RG se puede observar que en las áreas donde se presenta mayor RMPS y menor PT, el RG fue menor, por lo tanto, en base al análisis de la distribución espacial se puede establecer que existe una relación inversa del RG con la RMPS y una relación directa con la PT. Aunque el sistema de siembra directa genera suelo más compactado que el sistema de labranza convencional, se obtiene mayor rendimiento de granos, esto se debe principalmente a que en siembra directa, se mejoran las condiciones del sistema edáfico, sin embargo, los resultados de este estudio demuestran la necesidad de escarificar los suelos compactos en un sistema de siembra directa, para mejorar el rendimiento de granos, en este sentido, en un estudio realizado por Da Silva y Teixeira ⁽⁴⁰⁾, en donde evaluaron el efecto de la compactación en el rendimiento de maíz en diferentes manejos de suelo: siembra directa y siembra directa con escarificación, observaron mayor rendimiento en suelos bajo sistema de siembra directa escarificado.

También es importante mencionar que, la preparación de suelo (tránsito de maquinarias), afecta la PT y la DAp de suelo, principalmente en la camada de 0 a 10 cm de profundidad, y en el caso de la RMPS, el efecto se ve hasta los 30 cm de profundidad (35, 36, 42). Así mismo Schenatto *et al.* ⁽⁴⁷⁾ evaluaron la distribución espacial de la RMPS y su relación con el RG en un manejo de siembra directa, y los resultados demostraron que la RMPS y RG presentan una relación inversa en las profundidades de 10-20 y 20-30 cm, no influenciando en la profundidad de 0-10 cm en el RG. Martínez-Gamiño *et al.* ⁽⁴⁸⁾ observaron que, al practicar agricultura de conservación, se logra mejorar la calidad del suelo y el rendimiento de maíz.

CONCLUSIONES

El área de estudio presenta alta resistencia mecánica a la penetración (>2 MPa) y densidad aparente ($>1,5$ g.cm⁻³) en los primeros 20 cm de profundidad. La humedad del suelo es mayor en la capa superficial (0-20 cm) que en la inferior (20-30 cm), mientras que la porosidad total y la velocidad de infiltración son bajas, considerando la textura arenosa del suelo.

Las propiedades físicas evaluadas muestran una distribución espacial heterogénea en todas las profundidades. Sin embargo, el rendimiento de maíz es mayor a 6.500 kg.ha⁻¹ en el 75% del área y se distribuye más homogéneamente que las propiedades del suelo. Se observa una ligera reducción del rendimiento en zonas compactadas (RMPS >2 MPa, DAp $>1,5$ g.cm⁻³ y PT $<45\%$).

Declaración de financiamiento:	Al programa de incentivo del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), dentro del marco fortalecimiento de maestrías nacionales
Declaración de conflicto de intereses:	Los autores declaran que no poseen conflicto de intereses
Declaración de autores:	Los autores autorizan a la Revista de la Sociedad Científica del Paraguay a publicar y difundir el artículo del cual son autores, por los medios que considere apropiado.
Contribución de autores:	DES: Planificación del experimento. Financiamiento del proyecto. Metodología. Investigación. Análisis e interpretación de datos, redacción del manuscrito. JJBA: Conceptualización del experimento. Metodología. Interpretación de los resultados, revisión del manuscrito. RFI: Interpretación de los resultados, revisión del manuscrito. ADDM: Revisión del manuscrito JWRA: Metodología. Redacción y revisión del manuscrito.
Agradecimientos:	A la Cooperativa Volendam Ltda., por apoyar la elaboración de este trabajo, proveyendo el área de estudio, alojamiento y transporte interno durante el desarrollo de la investigación a campo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Food and Agriculture Organization. Planning for sustainable use of land resources: towards a new approach. Background paper to FAO's Task Managership for Chapter 10 of Agenda 21 of the United Nations Conference on Environment and Development (Unced). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 1995. 60 p.
2. Cámara Paraguaya de Exportadores y Comercializadores de Cereales y Oleaginosas. Área de siembra, producción y rendimiento de maíz. 2024. Disponible en: <https://capeco.org.py/area-de-siembra-produccion-y-rendimiento/>
3. Martínez Gamiño MÁ, Osuna Ceja ES, Espinosa Ramírez M. Impacto acumulado de la agricultura de conservación en propiedades del suelo y rendimiento de maíz. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 2019; 10(4): 765–778. Disponible en: <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1640>
4. Rasche Álvarez JW, Gomez EJ, Fatecha Fois DA, Leguizamón Rojas CA. Soil compaction and its effect on the vegetative growth of soybean, corn and pigeon pea. Investig Agrar. 2020;22(1):13-21. Disponible en: <https://doi.org/10.18004/investig.agrar.2020.junio.13-21>
5. Gueçaimburu JM, Vázquez JM, Tancredi F, Reposo GP, Rojo V, Martínez M, et al. Evolución del fósforo disponible a distintos niveles de compactación por tráfico agrícola en un argiudol típico. Chil j agric anim sci. 2019Disponible en: <https://doi.org/10.4067/S0719-38902019005000203>
6. Rosales-Naranjo L, Pérez-Rodríguez M, Herrera-Puebla J, González-Rodríguez JA, Cid-Lazo G. Efecto del manejo del suelo sobre la infiltración en un suelo Ferralítico Rojo compactado Revista Ingeniería Agrícola. 202; 10 (4). Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/5862/586264983003/html/>

7. Rossetti KDV, Centurion JF. Use of s-index as a structural quality indicator for compacted latosols cultivated with maize. *Revista Caatinga*. 2018; 31(2), 455–465. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/1983-21252018v31n222rc>
8. Barros CAP, Nunes MC, Bayer C, Minella LPG, Uhde LT, Weiler DA, Drescher MM. Manejo e conservação do solo e da água. Santa Maria, Brasil: Sociedade Brasileira de Ciencia do Solo; 2024.
9. Hasang Moran ES, García Bendeúz SJ, Carrillo Zenteno MD, Durango Cabanilla WD, Medina Litardo RC, Lombeida García ED. Evaluación de sistemas productivos de maíz, sobre la sostenibilidad económica. *Rev. Soc. cient. Py*. 2022;27(1):8-30. Disponible en: <https://sociedadcientifica.org.py/ojs/index.php/rscpy/article/view/231>
10. Pellegrini A, Barbosa CM de C. Manejo e conservação do solo e água. Volume 1- formação, implantação e metodologias. 1th. ed. Coritiba, Brasil: Rede Paranaense de Agropesquisa e Formacao Aplicada; 2023.
11. Gómez-Calderón N, Estrada-León RJ. Conservación de suelos mediante el cambio de frecuencia de labranza: un caso en Costa Rica. *Ciencias Ambientales*. 2020; 54(1): 123-139. Disponible en: http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-38962020000100123&lng=en
12. Villazón-Gómez JA, García-Reyes RA, Martín-Gutiérrez G, Cobo-Vidal, Y. Variabilidad espacial de la compactación en un haplustept bajo maíz con laboreo convencional. *Idesia (Arica)*. 2024; 42(3), 3–8. Disponible en: <https://doi.org/10.4067/s0718-34292024000300003>
13. Pastén M, González V, Espínola C. Clasificación climática del Paraguay utilizando los métodos de Köppen y Thornthwaite. San Lorenzo, Paraguay. 2011; 17 p. Disponible en: <http://sdi.cnc.una.py/catbib/documentos/525.pdf>
14. López GLG, Lesme BJA. Grandes grupos de suelos de la región Oriental del Paraguay. San Lorenzo: Sociedad Paraguaya de Ciencia del Suelo; 2024.
15. Roel Á, Terra, J. Agricultura de precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. 2006; 65. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/415432811/4-Cap-Muestreo-de-Suelos-y-Factores-Limitantes-de-Rendimiento>.
16. Monroy Rodríguez FL, Álvarez Herrera JG, Alvarado Sanabria, OH. Distribución espacial de algunas propiedades físicas del suelo en un transecto de la granja Tunguavita, Paipa. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*. 2017; 20(1), 91–100. Disponible en: <https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n1.2017.66>.
17. Klein, VA. Física do solo. 2 ed. Brasil, BR. Editorial UPF Universidade de passo Fundo. 212 p; 2012.
18. USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos). Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. 1999. Disponible en: http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/stelprdb1044786.pdf
19. Virgen-Vargas J, Zepeda-Bautista R, Avila-Perches MA, Espinosa-Calderón A, Arellano-Vázquez JL, Gámez-Vázquez AJ. Líneas de producción de semilla de maíz: densidad poblacional e interacción. *Agronomía Mesoamericana*. 2014; 25 (2), 323-335. Disponible en: http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1659-13212014000200010&lng=en&tlng=en
20. Vieira SR. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais RF, Alvarez VVH, Schaefer CEGR. Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência de Solo. 2000; 1-54. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/313098532>
21. Dicoyskiy RLM. Estadística Básica. Universidad Nacional de Ingeniería. Uninorte. 2012. Disponible en: <https://luisdi.files.wordpress.com/2008/08/curso-i-de-estadistica.pdf>
22. Warrick AW, Nielsen DR. Spatial Variability of Soil Physical Properties in the Field. In *Applications of Soil Physics*. 1980; 319–344. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-348580-9.50018-3>
23. Landim PMB. Análise estatística de dados geológicos. São Paulo: UNESP, 1998. 226 p.
24. Kitamura AE, Carvalho MdeP, Lima CGdaR. Relação entre a variabilidade espacial das frações granulométricas do solo e a produtividade do feijoeiro sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*. 2007; 31(2), 361–369. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000200018>
25. Cambardella CA, Moorman TS, Novak JM, Parkin TS, Karlen OL, Turco RF, Konopka AE. Field scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1994; 58 (5),1501-1511. Disponible en: <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
26. Bareta Junior E, Silva AAP da, Sens TMZG, Colecha K, Rampim L, Pott CA. Propiedades físicas del suelo en niveles variables de compactación. *RSD*. 2021; 10(2):e2341028686. Disponible en: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/8686>
27. USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos) Soil survey manual. USA. 2017; 1(18) 587. Disponible en: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-09/The-Soil-Survey-Manual.pdf>
28. Backes RA, Mulazzani RP, Fachi SM, Boeno D, Dutra JF, Schmitz JLS, Ivonir GP. Alterações em propriedades físico-hídricas de um latossolo argiloso cultivado com sucessão trigo e plantas de cobertura. *Caderno de Ciências Agrárias*. 2024; 1(16), 1-10. Disponible en: <https://doi.org/10.35699/2447-6218.2024.48962>
29. Rauber LR, Reinert DJ, Gubiani PI, Loss A. Structure and water infiltration in an Ultisol affected by cover crops and seasonality. *Soil and Tillage Research*. 2025; 247(1), 106366. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106366>

30. Gómez JAV, Gutiérrez GM, Vidal YC, Tablada RCN, Reyes RAG. Spatial variability of soil resistance to penetration on a chromic haplustert under natural grassland. 2022; 40(1),7-14. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292022000100007>
31. Balbuena R, Botta G, Draghi L, Rosatto H, Dagostino C. Compactación de suelos. Efectos del tránsito del tractor en sistemas de siembra directa. In Spanish Journal of Agricultural Research. 2003; 1(2). Disponible en: <https://sjar.revistas.csic.es/index.php/sjar/article/download/23/20/>
32. Rosa Filho G, Carvalho MdeP, Andreotti M, Montanari R, Binotti FFdaS, Gioia MT. Variabilidade da produtividade da soja em função de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférrico sob plantio direto. Revista Brasileira de Ciência Do Solo. 2009; 33(2), 283–293. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000200006>
33. Topa D, Cara IG, Jitäreanu, G. Long term impact of different tillage systems on carbon pools and stocks, soil bulk density, aggregation and nutrients: A field meta-analysis. Catena. 2021; 199(1), 105102. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.105102>
34. Jabro JD, Stevens WB, Iversen WM, Sainju UM, Allen BL. Soil cone index and bulk density of a sandy loam under no-till and conventional tillage in a corn-soybean rotation. Soil and Tillage Research. 2021; 206(1), 104842. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104842>
35. Souza ZM, Silva MLS, Guimarães GL, Campos DTS, Carvalho MP, Pereira GT. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Latossolo Vermelho distrófico sob semeadura direta em Selvíria (MS). Revista Brasileira de Ciência do Solo. 2001; 25(3), 699–707. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000300019>
36. Grosso JA, Ressia JM, Bongiorno CV, Mendivil GO. Caracterización del estado de compactación de un suelo bajo siembra directa utilizando herramientas de geoestadística. Ciencias Agronómicas. 2022;(34):e004. Disponible en: <https://cienciasagronomicas.unr.edu.ar/index.php/agro/article/view/20>
37. Giráldez JV, Vanderlinden K, Ten berge HF. La evaporación del agua del suelo bajo control atmosférico. 1999. Disponible en: https://abe.ufl.edu/faculty/carpenna/files/pdf/zona_no_saturada/estudios_de_la_zona_v4/iv-07.pdf
38. Castellanos-Navarrete A, Chocobar-Guerra A, Cox R, Fonteyne S, Govaerts B, Jespers N, Kienle F, Sayre KD, Verhulst N. Guía útil para comparar las prácticas de manejo de cultivo. CIMMYT. 2013; 1(3). Disponible en: <https://repository.cimmyt.org/entities/publication/6dcd1d18-fe6c-4cb9-a0a0-23a99918f4c4>
39. Santos GAD, Dias Junior MDS, Guimarães PTG, Furtini Neto AE. Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) cultivadas em solos distintos. Ciência e Agrotecnologia. 2005; 29(4), 740-752.
40. Da Silva A, Teixeira R. Simulação do efeito da compactação do solo na produtividade em diferentes manejos em latossolo vermelho distroférrico. Apresentado no XLVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – CONBEA. 2017. Disponible en: <https://conbea.sbea.org.br/anais/publicacoes/conbea-2017/anais-2017/eas-engenharia-de-agua-e-solo-6/1020-simulacao-do-efeito-da-compactacao-do-solo-na-produtividade-em-diferentes-manejos-em-latossolo-vermelho-distroferrico/file>
41. CAPECO (Cámara Paraguaya de Exportadores y Comercializadores de Cereales y Oleaginosas). Área de siembra, producción y rendimiento de maíz. 2019. Disponible en: <https://capeco.org.py/area-de-siembra-produccion-y-rendimiento/>
42. Klein VA, Libardi PL. Bulk density and pore size distribution of an oxisol under different use and management systems. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 2002; 26(4),857-867. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000400003>
43. Silva AJ, Nogueira da MSVC, Lima JFWL. Effect of use and management systems on the physical and hydraulic properties of a Yellow Argisol of coastal tablelands. Revista Brasileira de Ciência do Solo. 2005; 29(6),833-842. Disponible en: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000600001>
44. Tolón-Becerra A, Tourn M, Botta GF, Lastra-Bravo X. Effects of different tillage regimes on soil compaction, maize (*Zea mays* L.) seedling emergence and yields in the eastern Argentinean Pampas region. Soil and Tillage Research. 2011; 117(1), 184–190. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.003>
45. Colmán RPJ, Marques Genú A, Campos Lustosa SB, Pott CA. Propiedades físicas de suelos en pasturas de *Urochloa brizantha* cv. Marandú en el distrito de Jasy Cañy, Paraguay. Acta Agronómica. 2018; 67(3), 414–419. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/acag.v67n3.68923>
46. Matiasso S, Tortelli GM, Vieira ML. Curvas de retenção de água e rendimento de milho em plantio direto e escarificado. Pelotas.RS (BR). X Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo Fatos e Mitos em Ciência do Solo. 2014.
47. Schenatto K, Souza EG, Bazzi CL, Bier VA, Betzek NM, Gavioli A. Data interpolation in the definition of management zones. Acta Scientiarum. Technology. 2016; 38(1), 31. Disponible en: <https://doi.org/10.4025/actascitechnol.v38i1.27745>
48. Martínez-Gamiño MÁ, Osuna Ceja ES, Espinosa Ramírez M. Accumulated impact of conservation agriculture on soil properties and corn yield. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 2019; 10(4), 765-778. Disponible en: <https://doi.org/10.29312/remexca.v10i4.1640>