

PROPIEDADES FÍSICAS E HÍDRICAS EN EL CULTIVO DE LA SOJA (*Glycine max*)

Physical and water properties in soybean (*Glycine max*) cultivation

Ariel Benítez Insfran¹, Ursino Federico Barreto Riquelme², Derlys Fernando López Ávalos³

RESUMEN

El departamento de San Pedro, Paraguay, presenta niveles moderados a graves de degradación del suelo principalmente debido a la compactación. Una buena alternativa es la incorporación de la agricultura de precisión en el paquete tecnológico, con el fin de mejorar la calidad y el rendimiento de los cultivos agrícolas. La investigación tuvo como objetivo general evaluar las propiedades físicas e hídricas del suelo sobre sistema de siembra directa utilizando tecnología de agricultura de precisión y su influencia en el rendimiento. Se utilizó una parcela de 82.74 hectáreas, la cual fue dividida en grillas de dos hectáreas para realizar muestreos de compactación del suelo a unas profundidades de 0-10, 10-20, 20-30 y 30-35 cm, humedad del suelo y el rendimiento de soja, y también los niveles de materia orgánica, pH, fósforo y potasio. Los resultados fueron los siguientes; los niveles de materia orgánica fueron muy bajos presentando niveles en promedio general de 1.8 %; el nivel de pH que presentó la parcela estudiada fueron relativamente bajas de acuerdo a la necesidad de los cultivos agrícolas, de esta manera en promedio general el nivel de pH fue de 5.2, indicando que mayoritariamente el suelo es ácido. Los resultados en promedio general de los niveles de potasio y fósforo fueron de 0.14 Cmol kg⁻¹ y de 9.22 mg kg⁻¹ respectivamente. No se observó compactación del suelo a una profundidad de 0 a 10 cm; sin embargo, a profundidades mayores a 10 cm, se presentaron variabilidades en la resistencia a la penetración mecánica, con un promedio de humedad del suelo de 19.32 % al momento del muestreo. Se concluye que, el rendimiento del cultivo de soja fue muy bajo, lo cual, demuestra el efecto que ocasionan la compactación, baja humedad y la deficiencia en los principales nutrientes.

Palabras clave: agricultura de precisión, compactación, humedad, rendimiento.

ABSTRACT

The department of San Pedro, Paraguay, presents moderate to severe levels of soil degradation mainly due to compaction. A good alternative is the incorporation of precision agriculture in the technological package, in order to improve the quality and yield of agricultural crops. The general objective of the research was to evaluate the physical and hydric properties of the soil on a no-tillage system using precision agriculture technology and its influence on yield. A plot of 82.74 hectares was used, which was divided into two-hectares grids for soil compaction sampling at various depths 0-10, 10-20, 20-30 and 30-35 cm, soil moisture and soybean yield, as well as organic matter, pH, phosphorus and potassium levels. The results were as follows: the levels of organic matter were very low, with a general average level of 1.8 %; the pH level of the plot studied was relatively low according to the needs of agricultural crops, so the general average pH level was 5.2, indicating that the soil is mostly acidic. The general average potassium and phosphorus levels were 0.14 cmol kg⁻¹ and 9.22 mg kg⁻¹ respectively. Soil compaction was not observed at a depth of 0 to 10 cm; however, at depths greater than 10 cm, there was variability in the resistance to mechanical penetration, with an average soil moisture content of 19.32 % at the time of sampling. It is concluded that the soybean crop yield was very low, which demonstrates the effect caused by compaction, low humidity and deficiency in the main nutrients.

Keywords: precision agriculture, compaction, moisture, yield.

¹ ✉ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Concepción, Paraguay. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-8154-0311>. arielbenitezi1988@gmail.com

² Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción, Paraguay. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-2918-0281>. federicobarreto1975@hotmail.com

³ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Concepción, Paraguay. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4371-9723>. derlysfernando@hotmail.com

INTRODUCCIÓN

Las propiedades del suelo, físicas, químicas y biológicas, son elementos fundamentales para la agricultura por proveer de agua y nutrientes a los cultivos; además, interviene en los ciclos del agua, carbono, nitrógeno, fósforo y otros elementos de interés (Ferrerías et al., 2015). La productividad de un suelo no solo depende de los contenidos nutrimentales sino también de las características físicas del mismo, ya que como es bien conocido, el desarrollo de la parte aérea dependerá del desarrollo de la raíz (Hatfield et al., 2017).

La diversidad de sistemas, en el manejo de suelo, posee varias finalidades con el afán de minimizar los efectos de la degradación en su estructura, que ocurren por medio de la compactación y por consecuente produce la resistencia a la infiltración del agua, los cuales pueden comprometer el desarrollo del sistema radicular (Espinoza et al., 2018). La dificultad producida por la compactación de suelo disminuye el desarrollo y crecimiento de todos tipos de plantas ya que este afecta la capacidad de aprovechamiento de agua y nutrientes del suelo por las raíces, la compactación no solo afecta el aprovechamiento de agua y nutrientes sino también la aireación en el suelo y a la vez favorece la aparición de sustancias tóxicas influyendo en la reducción del potencial productivo de todas especies vegetales (Gómez et al., 2018).

El sistema radicular tiene como funciones principales sostener a las plantas, absorber agua y nutrientes para su desarrollo y producción, en toda etapa depende de los factores químicos, físicos y biológicos del suelo, además de los factores genéticos intrínsecos de cada cultivo (Bouma, 2014). Por eso es importante comprender su distribución, con la idea de alcanzar medios de inducir a la planta a una mayor exploración del suelo, alcanzando así el máximo de expresión productiva.

La fertilización con base a sensores ópticos es utilizada para determinar las cantidades de fertilizantes en parcelas con diferentes manejos (Solgi et al., 2015). Según Delgado et al. (2011), la agricultura de precisión (AP) podría describirse como un conjunto de sistemas de apoyo a la decisión que buscan gestionar la variabilidad espacial y temporal, con el fin de maximizar el rendimiento, calidad y beneficio de los cultivos, así como mejorar la eficiencia de los insumos y los resultados ambientales minimizando el daño

ambiental en cada unidad de tierra (tanto tierras de cultivo gestionadas, como tierras impactadas por tierras de cultivo), ya sea en hectáreas o subhectáreas.

Yost et al. (2019) refieren sobre la necesidad de una importante adecuación y desarrollo de recursos humanos en las nuevas tecnologías, para impactar a gran escala en el mejoramiento de la producción en la agricultura. Asimismo, Walter et al. (2017), manifiestan que se puede mejorar la producción a través de esta tecnología de precisión y llegar a la sostenibilidad de los sistemas de producción de nuestro país.

En base a lo expuesto, la investigación tuvo como objetivo evaluar las propiedades físicas e hídricas del suelo sobre sistema de siembra directa utilizando tecnología de agricultura de precisión y su influencia en el rendimiento del cultivo de soja (*Glycine max*).

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de la zona de estudio

El experimento se instaló en condiciones de campo; en la Estancia Grupo Liebig parcelas de producción continua, ubicado en el Distrito de General Isidoro Resquin situado en el departamento de San Pedro, Paraguay, distante a 27 km de la ciudad, con una elevación de 227 m s.n.m., con las coordenadas UTM (-24° 04' 46" S; 56° 29' 44" O), para dichas determinaciones se utilizó un GPS de la marca Juno 3B.

El tipo clima es húmedo y lluvioso, la humedad relativa es de 70 a 80 %, la zona se caracteriza por presentar una temperatura promedio de 23 °C con máximas que pueden llegar hasta 35 °C en estaciones de verano y mínimas de hasta 5 °C en estaciones de invierno, con leves incidencias de heladas. La precipitación media anual es de 1 450 mm, según datos proveídos por la Estación Meteorológica de la propia estancia.

El suelo de la región posee las siguientes características, taxonómicamente pertenece al orden Alfisol, de textura franco arenosa y de fertilidad media a baja (López et al., 1995), para la determinación de las demás propiedades se extrajeron 420 submuestras de 42 puntos de gradillas determinados previamente de donde se obtuvieron 42 muestras, tomados al azar y en zigzag a una profundidad de 20 cm se remitió al laboratorio de LABOR SOLO, 2018, cuyos resultados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características químicas del suelo utilizado en el experimento, Gral Isidoro Resquin, San Pedro, 2018.

P	pH	pH	H+Al	Al	Ca	Mg	K	CIC	P	MO	V1	A	S	Fe	Cu	Zn	B	Mn
1	5.1	6.1	4.7	0.7	4.8	1.4	0.33	11.3	6.7	2.2	58	23	10.6	70.6	0.4	0.7	0.33	13.3
2	5.9	6.3	4.0	0.0	5.5	1.3	0.16	11.0	12.2	2.0	64	22	10.9	56.7	0.2	0.5	0.35	3.9
3	5.4	6.1	4.6	0.3	4.0	1.7	0.11	10.4	6.5	1.7	56	24	11.1	46.3	0.3	0.3	0.34	9.2
4	5.4	6.1	4.5	0.2	4.3	2.2	0.09	11.1	6.0	1.9	59	22	11.8	61.1	0.3	0.3	0.36	9.4
5	5.2	6.2	4.5	0.5	6.2	1.5	0.12	12.2	7.0	2.3	64	23	11.3	79.9	0.4	0.5	0.34	12.2
6	5.1	6.1	4.5	0.6	3.7	2.5	0.10	10.8	6.2	2.0	59	24	10.9	64.5	0.4	0.4	0.31	12.2
7	5.4	6.4	3.6	0.3	5.7	1.2	0.11	10.6	7.7	2.0	66	22	11.4	50.8	0.4	0.4	0.15	8.70
8	5.0	6.4	3.8	0.6	3.4	1.6	0.18	9.0	23.6	1.5	57	23	11.3	39.8	0.3	0.4	0.30	11.7
9	5.3	6.1	4.5	0.5	4.7	1.3	0.11	10.6	8.0	2.1	57	24	11.2	61.3	0.6	0.4	0.34	8.9
10	5.1	6.0	5.0	0.7	3.3	1.5	0.09	9.8	7.1	1.9	49	21	12.0	46.7	0.5	0.4	0.33	6.9
11	5.3	6.1	4.7	0.5	3.4	1.2	0.12	9.4	8.0	1.9	50	22	11.2	52.0	0.4	0.4	0.35	7.8
12	5.2	6.2	4.4	0.5	3.1	1.2	0.15	8.8	8.5	1.8	51	23	11.8	49.7	0.4	0.3	0.36	7.4
13	5.0	5.9	5.2	1.0	3.5	1.5	0.13	10.3	21.4	1.9	50	24	11.0	52.0	0.5	0.3	0.37	10.6
14	4.9	4.6	4.6	1.1	3.4	0.8	0.14	8.9	8.3	2.0	49	22	9.2	41.7	0.5	0.3	0.37	7.6
15	4.8	5.7	6.0	1.1	2.4	0.8	0.14	9.4	9.8	1.9	36	25	9.0	45.2	0.4	0.3	0.35	10.0
16	5.1	6.0	4.8	0.7	2.9	1.1	0.29	9.1	11.7	2.0	47	23	8.7	48.8	0.4	0.4	0.36	7.0
17	5.1	6.1	4.8	0.7	2.7	0.6	0.18	8.3	9.5	2.3	42	24	9.4	42.7	0.3	0.3	0.32	8.2
18	4.7	5.9	5.3	1.6	1.7	0.9	0.16	8.1	9.9	1.9	35	23	9.1	43.9	0.6	0.4	0.28	7.4
19	4.9	6.1	4.5	1.0	2.9	1.0	0.16	8.7	9.8	1.8	48	24	8.9	51.8	0.5	0.3	0.34	8.9
20	5.2	6.3	4.1	0.5	3.2	1.1	0.15	8.6	8.2	1.9	52	23	9.0	40.7	0.5	0.4	0.33	7.7
21	5.2	6.2	4.5	0.4	2.7	1.4	0.14	8.7	9.7	1.8	49	24	9.1	53.4	0.6	0.3	0.36	6.4
22	5.6	6.0	4.8	0.0	3.9	1.6	0.20	10.5	10.5	1.9	54	25	8.9	48.5	0.5	0.4	0.37	5.2
23	5.3	6.2	4.2	0.3	3.2	1.6	0.21	9.2	9.2	2.0	54	23	8.7	48.0	0.4	0.4	0.37	7.7
24	5.2	6.2	4.2	0.6	3.1	1.2	0.12	8.6	8.3	2.1	51	22	8.5	42.3	0.4	0.3	0.37	7.4
25	5.3	6.3	4.0	0.5	2.8	0.8	0.09	7.7	10.2	1.5	48	24	8.7	47.0	0.4	0.3	0.38	5.8
26	5.1	6.3	3.9	0.6	2.0	0.5	0.16	6.5	7.4	1.6	40	22	9.4	33.2	0.4	0.3	0.38	6.4
27	5.0	6.3	4.1	1.1	2.6	1.2	0.13	8.0	8.7	1.4	48	24	8.9	33.6	0.5	0.3	0.36	8.3
28	4.3	6.3	3.9	1.9	3.4	1.3	0.12	8.8	7.0	1.8	55	24	8.7	33.1	0.5	0.3	0.45	7.0
29	5.2	6.2	4.4	0.5	3.1	1.1	0.10	8.7	6.2	2.0	49	23	8.5	34.2	0.4	0.4	0.37	6.9
30	5.1	6.1	4.8	0.7	2.6	0.9	0.10	8.3	10.6	2.1	42	25	8.7	37.5	0.4	0.3	0.37	5.8
31	4.9	6.0	5.1	1.1	2.5	1.4	0.13	9.0	10.6	1.7	44	24	8.7	36.6	0.4	0.3	0.33	8.5
32	5.5	6.3	4.0	0.2	3.3	0.9	0.11	8.4	8.3	1.7	52	22	8.3	34.6	0.5	0.4	0.36	5.4
33	5.1	6.3	4.0	0.6	2.2	1.1	0.14	7.5	7.9	1.6	46	23	8.4	30.0	0.4	0.4	0.34	7.3
34	5.3	6.4	3.8	0.4	3.5	1.0	0.12	8.4	8.0	1.6	55	22	8.1	33.6	0.5	0.5	0.31	5.9
35	5.2	6.7	3.0	0.6	2.1	1.0	0.11	6.2	13.8	1.3	51	24	7.8	30.6	0.4	0.3	0.34	7.7
36	5.6	6.6	3.1	0.0	2.9	1.0	0.12	7.1	13.6	1.3	56	22	7.7	26.4	0.4	0.3	0.30	7.5

Unidad de medida: P (Puntos); pH (Agua y SMP); H+Al (Cmol kg⁻¹); Al (Cmol kg⁻¹); Ca (Cmol kg⁻¹); Mg (Cmol kg⁻¹); K (Cmol kg⁻¹); CIC (Cmol kg⁻¹); P (mg kg⁻¹); MO (%); V1 (%); Arcilla (%); S (mg kg⁻¹); Fe (mg kg⁻¹); Cu (mg kg⁻¹); Zn (mg kg⁻¹); B (mg kg⁻¹); Mn (mg kg⁻¹).

Tipo de grilla: 2 ha; Profundidad de muestreo, 0 - 20 cm.

Metodología

El estudio realizado fue del tipo cuasi experimental, con determinaciones cuantitativas y con análisis comparativo. Los datos fueron sometidos a los análisis de ecuaciones de geoestadística y estadísticas descriptivas donde los resultados y las interpretaciones se realizaron mediante mapas y figuras. En el trabajo se utilizó el sistema georreferenciado para la obtención de las muestras de análisis de suelo, compactación del suelo, humedad gravimétrica y el rendimiento de la soja, esto permitió realizar mapas de acuerdo a las variables estudiadas, obtenidas a partir de los resultados de los análisis de laboratorios, las muestras de suelos fueron

recolectadas en parcelas subdivididas en cuadrículas de aproximadamente dos hectáreas cada una.

La delimitación del área se realizó recorriendo por el borde del área, utilizando un GPS de la marca Juno 3B para el posterior cálculo exacto de hectáreas del terreno en estudio. El establecimiento del experimento se inició con la toma de muestras de suelos por puntos específicos, para su posterior análisis, y luego se procedió a la instalación de siembra de soja, la cual consistió en siembra y cosecha mecanizada con sembradora y cosechadora de la empresa Liebig. A los implementos de cosecha y siembra se incorporó una computadora con GPS donde se fueron marcando los puntos de siembra y posteriormente el rendimiento

(grilla de una muestra por cada 2 hectáreas). Seguidamente al terminar la cosecha fue realizada la muestra de resistencia a la penetración utilizando un Penetrómetro y la humedad gravimétrica del suelo. Una vez terminado los análisis de penetración y humedad, los datos fueron transferidos a una computadora, y mediante un software computacional llamado CR Campeiro 6.

Una vez realizada la delimitación del área e identificado cada punto de muestreo se procedió a muestrear cada punto o grillas de 2 hectáreas. Donde para el efecto, se muestreó el suelo de la siguiente manera; alrededor del punto exacto indicado por el GPS de cosecha, se colectaron cinco muestras alrededor del punto central, con el principal propósito de tener muestras más representativas posible de cada punto. Para identificar las condiciones de atributos químicos de los puntos de muestreo, se realizaron los análisis de suelo según las metodologías descritas por Tedesco et al. (1995) y EMBRAPA (1997). Dichos análisis se llevaron a cabo en el laboratorio de LABOR SOLO.

El rendimiento del soja fue determinado por los sensores instalados en las cosechadoras por cada punto generados en el laboratorio, dichos resultados fueron utilizados para la confección de los modelos digitales y consecuentemente a la estructuración de los

mapas de la fertilidad del suelo, en el que fue utilizado un programa computacional llamado "Sistema Agropecuario CR - Campeiro 6, en el que se utilizaron como base los criterios de interpretación, según las tablas de recomendaciones de fertilización y enclado para los estados de Río Grande del Sur y Santa Catarina (Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2004). Por otro lado, en el caso del fósforo y potasio fueron utilizados las tablas de recomendaciones para el sistema de siembra directa en Paraguay generadas por Cubilla et al. (2012).

Una vez obtenidos todos los datos, fueron sometidos a análisis de estadísticas básicas de tendencia central y de dispersión como promedio, desviación estándar, mínimo y máximo. Los resultados obtenidos están presentados e interpretados a través de figuras y mapas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Niveles de materia orgánica en el suelo

El porcentaje de materia orgánica (MO) en el suelo es muy importante; González et al. (2007) relataron con relación de la importancia de la MO que juega un papel fundamental en la estructuración del suelo, favorece la formación y estabilidad de los agregados, así también disminuye la compactación y el aumento de la humedad del suelo.

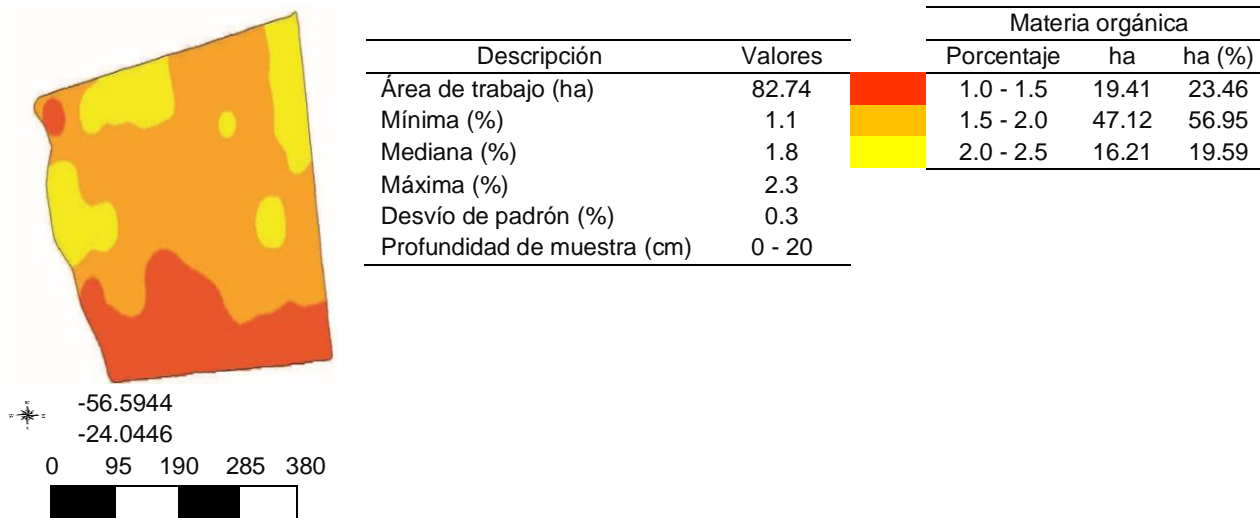


Figura 1. Resultado de los niveles de materia orgánica del muestreo realizado al suelo.

En la Figura 1 se observa la distribución espacial de la materia orgánica en la parcela estudiada, en la que se verifica que el 23.46 % del terreno total presenta una MO baja con 1.0 a 1.5 %, son áreas que necesitan el aumento de la MO para alcanzar niveles adecuados

donde esos niveles van a ayudar a mejorar la fertilidad del suelo. Por otro lado, el 56.95 % presenta un porcentaje de 1.5 a 2.0 % y el 19.59 % del área total presenta 2.0 a 2.5 % de materia orgánica, de esta manera la parcela estudiada presenta en promedio

general de 1.8 % de materia orgánica. Según Lal (2004) la MO juega un papel clave en la fertilidad de los suelos como fuente de nutrientes para las plantas y fuente de energía para los microorganismos.

Niveles de pH en el suelo

Los valores de pH en el suelo son muy importantes ya que puede influenciar en la disponibilidad de los nutrientes (Barrow y Hartemink, 2023). Según Delgado y Gómez (2016), cuando se trata de manejo químico del suelo, el pH es uno de los más importantes atributos, debido a que está directamente ligado a la solubilidad, concentración, disponibilidad y capacidad de retención de la mayoría de los nutrientes esenciales a las plantas. El pH óptimo para la mayoría de las plantas oscila entre 5.5 a 7.0 (Neina, 2019).

En la Figura 2 se observa la distribución espacial del pH. El 98.16 % del área presenta un pH con valores

entre 4.0 y 5.6, lo que indica que estas áreas necesitan correctivos para elevar su pH a niveles adecuados. Además, se observa que solo el 1.84 % del área total alcanzó niveles de pH entre 5.6 y 6.0. De acuerdo con los valores de pH del suelo obtenidos en los muestreos de campo, se determinó que el pH promedio en el área de estudio es de 5.2, con un valor mínimo de 4.3 y un máximo de 5.9.

De acuerdo con estos resultados, en términos generales, los suelos de la zona agrícola donde se recabaron los datos son predominantemente ácidos. El pH de un suelo ácido se puede mejorar gradualmente mediante el manejo apropiado y con aplicación de cal, con el cual se logra constituir un ambiente propicio en la raíz para un mejor desarrollo de las plantas (Benton, 2003). Por otra parte, valores extremos del pH pueden afectar la estructura del suelo (Läuchli y Grattan, 2012).

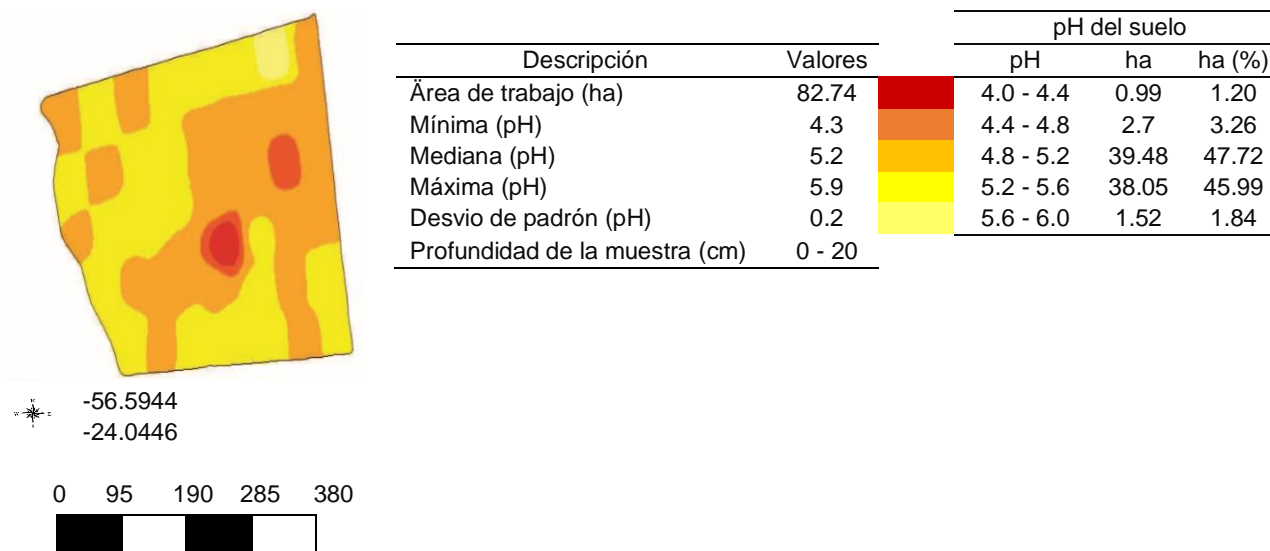


Figura 2. Resultado de los niveles de pH del muestreo realizado al suelo.

Niveles de Potasio (K) (Mehlich I) en el suelo

La lixiviación en suelos tropicales, es una de las causantes de la disminución de nivel de potasio disponible, por las aguas de percolación, principalmente en suelos arenosos hacia las capas horizontales del perfil del suelo (Mendes et al., 2016).

De acuerdo con lo observado en la Figura 3, la parcela estudiada presenta un alto déficit de potasio. El 71.51 % del área total estudiada muestra un nivel bajo, con valores que oscilan entre 0.06 y 0.15 Cmol kg⁻¹. El 20.95 % del área presenta un nivel medio, con valores entre 0.15 y 0.20 Cmol kg⁻¹. Sin embargo, el 7.54 % del

área estudiada mostró niveles altos de potasio (K), con valores de 0.20 a 0.36 Cmol kg⁻¹. En el déficit de potasio, uno de los principales síntomas que presenta la planta es la clorosis, debido a la movilidad del nutriente, consecuentemente, se traduce en la disminución del rendimiento y en la calidad de los productos cosechados (Römheld y Kirkby, 2010).

Hasanuzzaman et al. (2018), sostienen que el potasio es considerado como un elemento fundamental en la estructura de la planta por la función fisiológica y bioquímica que desempeña dentro de la misma y, además, porque a este elemento se le atribuye la resistencia al volcamiento, la baja susceptibilidad a

ciertas enfermedades y el incremento de la eficiencia del nitrógeno y fósforo que se añaden al suelo. El potasio es abundante en el suelo, pero siempre hay que tener cuidado de no realizar la extracción de la misma de forma exagerada sin su debida reposición

para evitar su decadencia o disminución en los suelos agrícolas (Osman, 2013). De esta manera es recomendable realizar una fertilización potásica en los lugares donde se verifiquen niveles inferiores a 0.15 Cmol kg⁻¹ de potasio (Osman, 2013).

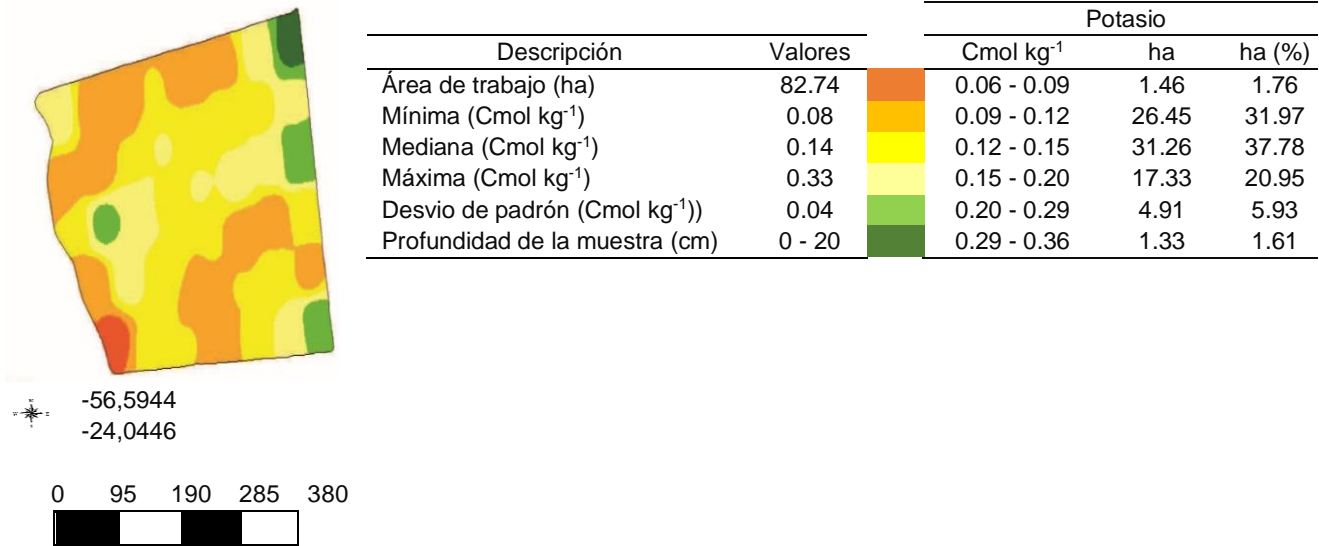


Figura 3. Resultado de los niveles de Potasio (K) del muestreo realizado al suelo.

Niveles de fósforo (P) (Mehlich I) en el suelo

La deficiencia de fósforo produce una marcada disminución del crecimiento de las plantas, derivada de una menor interceptación de la luz y de la reducción de la eficiencia de conversión de la luz en biomasa (Manfreda y Cogliatti 2006). Este efecto puede interpretarse como un resultado directo de insuficiencia de P para cumplir adecuadamente sus funciones estructurales y de transporte de energía en los procesos bioquímicos (Balemi y Negisho, 2012). En la mayoría de las plantas estos síntomas aparecen

cuando la concentración del fósforo en el suelo es inferior a 5 mg kg⁻¹. La aplicación de fósforo al cultivo en una época de crecimiento es muy baja el aprovechamiento, porque en el suelo más del 80 % del P se vuelve inmóvil y no disponible para la absorción de las plantas debido a la adsorción, precipitación o conversión a formas orgánicas (Balemi y Negisho, 2012). Por tanto, en muchos sistemas agrícolas la aplicación de fósforo al suelo es necesaria para asegurar la productividad de los cultivos (Wang y Lambers, 2020).

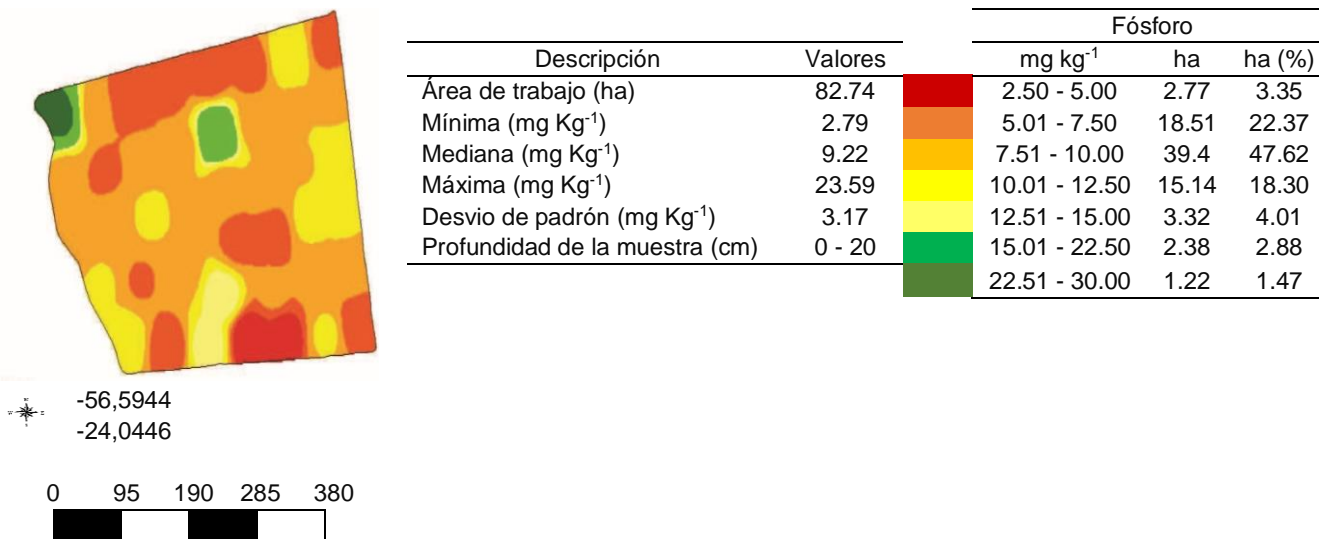
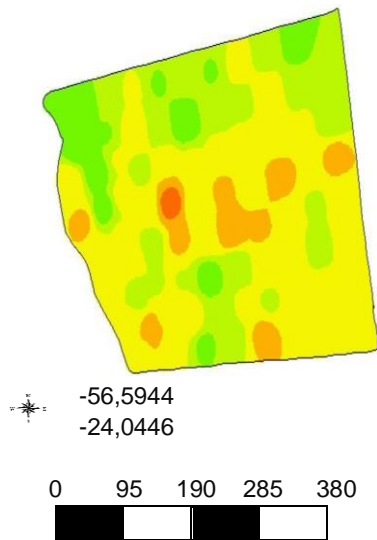


Figura 4. Resultado de los niveles de fósforo (P) del muestreo realizado al suelo.

De acuerdo a lo que se observa en el mapa de la Figura 4, se puede notar la variabilidad del fósforo en el terreno estudiado. Sólo el 4.35 % del área total presenta niveles ideales para el buen desarrollo del cultivo, con valores de 15.01 a 30.00 mg kg⁻¹. Sin embargo, el 95.65 % del área presenta deficiencia de fósforo, con valores que oscilan entre 2.50 y 15.00 mg kg⁻¹, lo que indica la necesidad de una corrección para mejorar la producción.

Según un trabajo de monitoreo de la fertilidad de los suelos de la Región Oriental, en 214 distritos, Paraguay se constató que más del 80 % de los análisis de suelos hechos desde el año 1980 hasta el 2002, se encuadraron en niveles bajos o de insuficiencia de P para las plantas (Fatecha, 2004). En los últimos años se han podido establecer, mediante trabajos de investigación conducidos a campo en Paraguay, categorías de disponibilidad de P en el suelo por debajo de los cuales los cultivos responden a la fertilización (Cubilla et al., 2007; Barreto, 2008). En el trabajo de Cubilla et al. (2007) se ha observado aumentos de los rendimientos con fertilización fosfatada en suelos de baja disponibilidad inicial de P en forma consistente en la Región Oriental del Paraguay.



Descripción	Valores	Humedad del suelo (%)			
		Porcentaje	ha	ha (%)	
Área de trabajo (ha)	82.74	10	0.47	0.57	
Mínima (%)	8.40	15	7.24	8.75	
Mediana (%)	19.32	20	43.17	52.18	
Máxima (%)	29.70	25	23.32	28.18	
Desvío de padrón (%)	3.79	30	8.54	10.32	

Figura 5. Resultado de los niveles de humedad (%) del muestreo realizado al suelo.

Resistencia del suelo, 0 a 10 cm

De acuerdo a los resultados observado en el mapa de la Figura 6, se puede notar que el 94.82 % no presenta compactación a una profundidad de 0 a 10 cm donde en promedio general la parcela estudiada presento una resistencia a la penetración de 913.14 kPa.

Niveles de humedad en el suelo (%)

En la Figura 5 se observa la distribución espacial de la humedad del suelo en la parcela estudiada. El 61.50 % del área total presenta niveles de concentración de humedad baja, oscilando entre 10 y 20 %. Además, se puede notar que la parcela tiene una mediana de humedad del 19.32 %, lo cual es un nivel bajo para un tipo de suelo arenoso. Según la FAO (2016), los suelos sanos con un elevado contenido de materia orgánica tienen la capacidad de almacenar grandes cantidades de agua, crucial para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, el exceso de la humedad del suelo y el estancamiento del agua en el perfil del mismo pone en riesgo su supervivencia, al privar a las raíces del oxígeno necesario para la respiración, además de propiciar condiciones para la reducción de los nitratos en el suelo y afectar otras reacciones metabólicas en la planta (Puebla, 2016). Berli (2001); Llique y Guerrero. (2014), manifiestan que la humedad del suelo representa uno de los factores en la compactación. Provocando la disminución de cohesión a mayor presencia de agua y debido a la rapidez con que se realiza el tránsito de la maquina agrícola; que causa la disminución capacidad de acercamiento y empaquetamiento de las partículas del suelo; lo cual provoca menor cambio de volumen.

La compactación de un suelo limita el crecimiento radicular y la cantidad de aire y agua de que disponilizan las raíces (Lampurlanés y Cantero-Martínez, 2003). Por su parte, Álvarez et al. (2009) menciona que este suceso se ha incrementado en los últimos años como consecuencia del proceso de agriculturización y al avance en la siembra directa.

Este efecto, en muchos casos, se suma a la compactación residual de los sistemas de labranza con arados de disco que entra a una profundidad de 10 cm. Según, Taboada et al. (2008) concluyeron que el

efecto de la compactación sobre el rendimiento de los cultivos depende de las condiciones climáticas que interactúan con las propiedades del suelo.

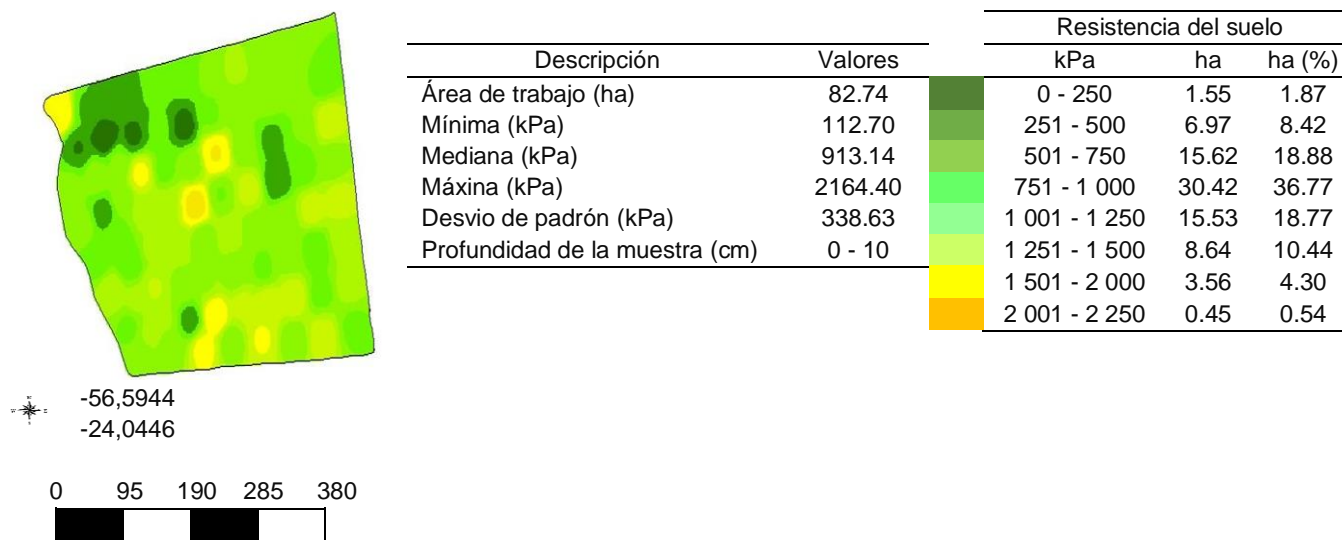


Figura 6. Resistencia del suelo de 0 a 10 cm de profundidad.

Resistencia del suelo, 10 a 20 cm

En el mapa de la Figura 7 se observa la variabilidad del terreno en relación con la resistencia a la penetración a una profundidad de 10 a 20 cm. El 90.62 % del área presenta una resistencia a la penetración que va de 1 501 a 3 250 kPa, lo que indica que la mayor parte de la parcela está compactada, dificultando el buen desarrollo de los cultivos. González et al. (2015), trabajando en suelos bajo siembra directa, han registrado una mayor acumulación de compactación superficial. Jorajuría y Draghi (2000), concluyen que el paso repetido de la maquina agrícola provoca las

compactaciones en el subsuelo. Jorajuría (2001) indicó que en la medida que aumenta el número de pasadas de la máquina agrícola, la profundidad del horizonte del suelo reacciona con un mayor incremento de la resistencia a la penetración y tiende a hacerse más superficial. Barrera et al. (2004) consideran que para que el cultivo pueda adaptarse a una condición de compactación que sobrepasen los 20 cm de profundidad sin perjudicar el rendimiento, es necesario conocer las propiedades mecánicas de los suelos compactados y de las condiciones de trabajo de los mismos.

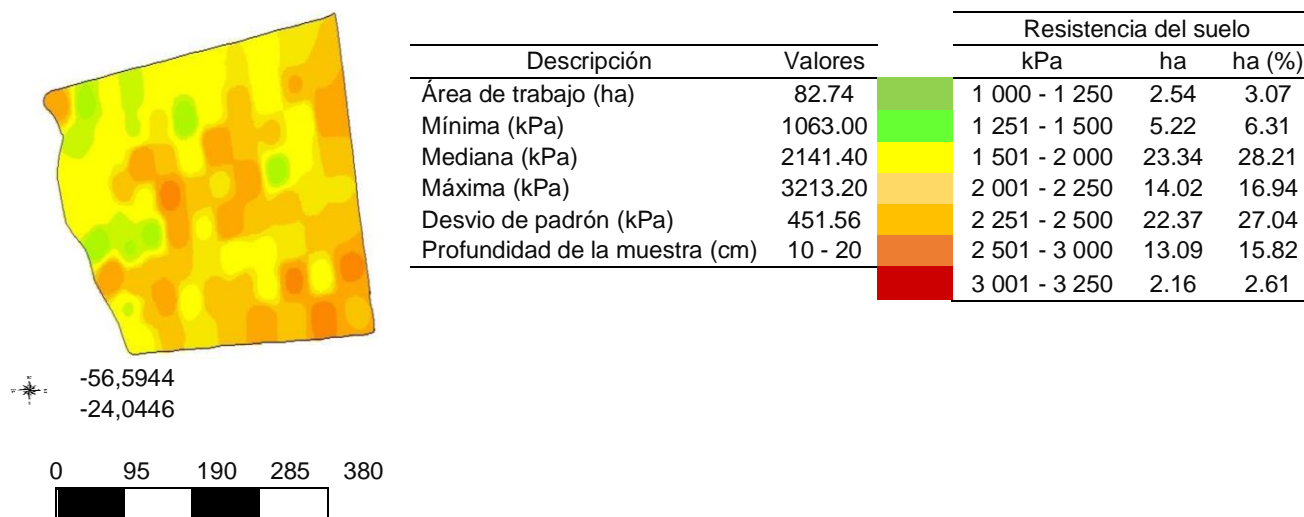


Figura 7. Resistencia del suelo de 10 a 20cm de profundidad.

Resistencia del suelo, 20 a 30 cm

En la Figura 8 se observa el resultado de la resistencia a la penetración que presenta el suelo a una profundidad de 20 a 30 cm, donde el 89.37 % presenta una resistencia que va de 1 501 kPa a 3 500 kPa donde eso indica que casi la totalidad de la parcela esta compactada, además, podemos notar que presenta en

promedio general de resistencia de 2034.12 kPa. Taboada et al. (2008) indican que el contenido de humedad es importante en la compactación y que condiciona las propiedades del suelo, ya que depende de la cantidad de agua en la masa del suelo para que las partículas y grupo de partículas minerales puedan reordenarse bajo una determinada energía de compactación.

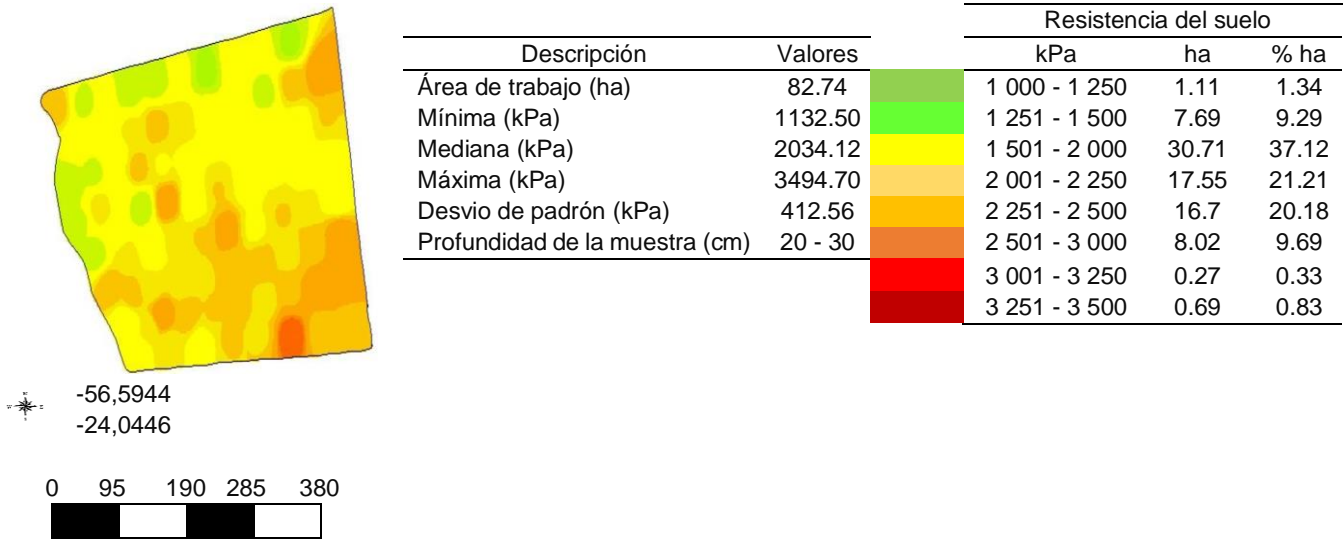


Figura 8. Resistencia del suelo de 20 a 30cm de profundidad.

Resistencia del suelo, 30 a 35 cm

Según muestra (Figura 9), el resultado de análisis de suelo realizado en la parcela en estudio, se puede notar que presenta una mediana de resistencia a la penetración de 1 680 kPa esto demuestra que casi la

totalidad de la parcela se encuentra con problema de compactación, además se observa que en algunos puntos de la parcela presenta resistencia a la penetración de 750 a 1 500 kPa que corresponde a 23.73 ha.

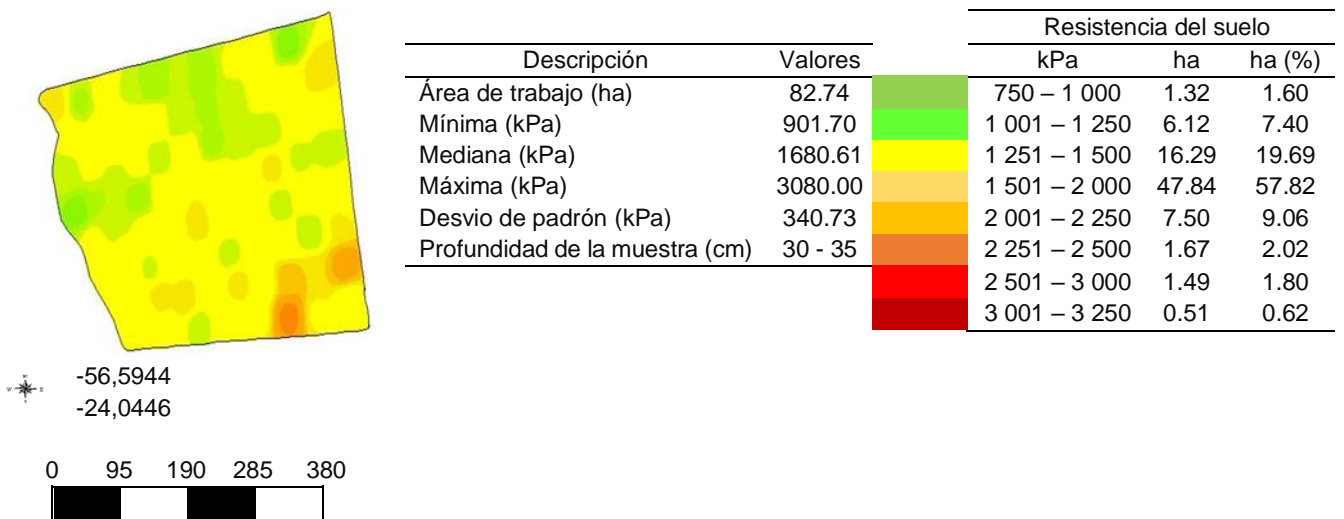
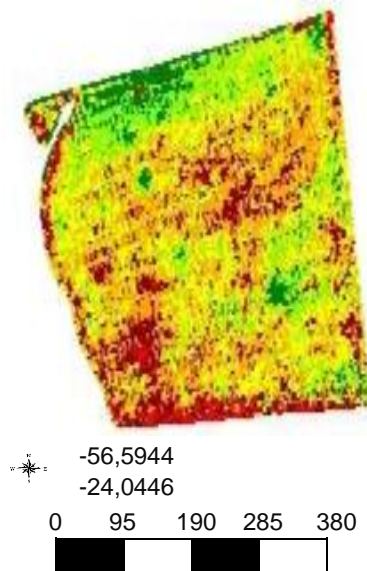


Figura 9. Resistencia del suelo de 30 a 35 cm de profundidad.

La compactación del suelo condiciona el empobrecimiento de sus calidades físicas, lo cual reduce el crecimiento de la raíz de la planta y las posibilidades de obtención de nutrientes, agua y aire. Por ende, provocan la disminución de los rendimientos agrícolas (Gysi et al., 2001).



Rendimiento de soja

De acuerdo a los observado en la Figura 10, se nota la variabilidad que presenta el terreno de acuerdo al rendimiento de soja de la zafra 2018/19, donde mayoritariamente presenta un rendimiento bajo, en promedio general un rendimiento de 2 316 kg ha⁻¹.

Descripción	Valores
Área de trabajo (ha)	82.74
Peso mínimo (kg ha ⁻¹)	1.816
Peso medio (kg ha ⁻¹)	2.316
Peso máximo (kg ha ⁻¹)	2.897

Figura 10. Rendimiento de soja zafra 2018/19 (kg ha⁻¹).

Taboada et al. (2008) llegaron a una conclusión que el efecto de la compactación del suelo sobre el rendimiento de los cultivos depende de varios factores como las condiciones climáticas que relacionan con las propiedades físicas. Por este motivo, el efecto es más severo en condiciones de estrés hídrico, sin embargo, en condiciones climáticas favorables, no se observan efectos adversos en los cultivos. Cabe mencionar que, durante el tiempo transcurrido del desarrollo del cultivo, el suelo recibió el tránsito correspondiente a la siembra, pulverización y cosecha del cultivo de soja, estos podrían ocasionar algunas compactaciones superficiales.

CONCLUSIONES

Los indicadores de MO, pH, K y P definieron más cercanamente el estado actual de la fertilidad del suelo y evidencian su degradación. El área de estudio presenta grandes variaciones con un pH bajo, así mismo de MO, potasio y fósforo, sin embargo, en algunos puntos presenta buena disponibilidad de los nutrientes que las plantas necesitan para el buen desarrollo. La resistencia a la penetración fue mayor

pasando a los 10 cm de profundidad esto indica que la materia orgánica y la cobertura que presenta la parcela en estudio juega un papel muy importante lo que hace que la primera camada (10 cm) no presente resistencia a la penetración. Los resultados de la humedad de la parcela estudiada demuestran que la parcela presenta una humedad de 19.32 % en promedio general lo cual es bajo para el tipo del suelo estudiado. El rendimiento del cultivo de soja fue muy bajo presentando muchas variaciones referentes a las condiciones físicas del suelo, lo cual nos demuestra el efecto que ocasionan la compactación, la baja humedad y la deficiencia en los principales nutrientes. Para afrontar estos desafíos es necesario implementar con urgencia la gestión de sistemas integrados para aumentar la eficiencia, usar de forma más racional el agua y desarrollar sistemas que permitan el empleo inteligente de insumos, entre muchos otros. Es aquí donde la agricultura de precisión tiene un papel importante, ya que existen tecnologías y prácticas que permiten al productor obtener buenos resultados económicos, además de procesos agrícolas más eficientes, responsables y rentables, que demandan mano de obra calificada y, en consecuencia, promueven una producción más sostenible.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, CR; Taboada, MA; Gutiérrez Boem, FH; Bono, A; Fernández, PL; Prystupa, P. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa region of Argentina (en línea). *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73:1242-1250. Disponible en <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0246>
- Balemi, T; Negisho, K. 2012. Manejo del fósforo del suelo y mecanismos de adaptación de las plantas al estrés por fósforo para la producción agrícola sostenible: una revisión (en línea). *Revista de ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 12(3):547-562. Disponible en <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162012005000015>
- Barrera, M; Garnica, P; Martínez, F. 2004. Influencia de la Succión en los Cambios Volumétricos de un Suelo Compactado (en línea). Instituto Mexicano del Transporte. México, 141 p. Disponible en <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt238.pdf>
- Barreto, UF. 2008. Recomendaciones de fertilización fosfatada e potásica para as principais culturas de grãos sob sistema plantio direto no Paraguai. Tese Doutorado. Universidade Federal de Santa María.
- Barrow, NJ; Hartemink, AE. 2023. The effects of pH on nutrient availability depend on both soils and plants (en línea). *Plant Soil* 487(1):21–37. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11104-023-05960-5>
- Benton, JJr. 2003. *Agronomic handbook* (en línea). Management of crops, soils, and their fertility. CRC PRESS. Boca Raton. London. New York. Washington, D.C. USA. 450 p. Disponible en <https://doi.org/10.1201/9781420041507>
- Berli, M. 2001. Compaction of agricultural subsoils by tracked heavy construction machinery. Dissertation submitted to the Swiss Federal Institute of Technology Zurich, for the degree of (en línea). Doctor Of Technical Sciences. 141 p. Disponible en <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/145507/eth-24435-02.pdf?sequence=2>
- Bouma, J. 2014. Soil science contributions towards sustainable development goals and their implementation: linking soil functions with ecosystem services (en línea). *Journal of plant nutrition and soil science*, 177(2):111-120. Disponible en <https://doi.org/10.1002/jpln.201300646>
- Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC. 2004. Manual de recomendações de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (en línea). Porto Alegre: SBCS – Núcleo Regional Sul, 2004. 394 p. Disponible en https://www.sbcs-nrs.org.br/docs/manual_de_adubacao_2004_versao_internet.pdf
- Cubilla, M; Wendling, A; Eitz, FL; Amado, TJC; Mielniczuk, J. 2012. Recomendaciones de fertilización para soja, trigo, maíz y girasol bajo el sistema de siembra directa en el Paraguay (en línea). *Asunción, Paraguay: CAPECO*. Disponible en https://capeco.org.py/wp-content/uploads/2015/06/libro-final_recomendaciones-de-fertilizacion-paraguay_2012.pdf
- Cubilla, MM; Amado, TJC; Wendling, A; Eitz, FL; Mielniczuk, J. 2007. Calibração visando à fertilização com fósforo para as principais culturas de grãos sob sistema plantio direto no Paraguai (en línea). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, 31:1463-1474. Disponible en <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600023>
- Delgado, A; Gómez, JA. 2016. La tierra. Propiedades físicas, químicas y biológicas (en línea). En: Villalobos, F, Fereres, E. (eds). *Principios de Agronomía para una Agricultura Sostenible*. Springer, Cham. Disponible en https://doi.org/10.1007/978-3-319-46116-8_2
- Delgado, J; Khosla, R; Mueller, T. 2011. Recent advances in precision (target) conservation (en línea). *Journal of Soil and Water Conservation*, 66(6):167A-170A. Disponible en <https://doi.org/10.2489/jswc.66.6.167A>
- EMBRAPA. 1997. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ) (en línea). Manual de métodos de análise de solo 2. ed. Rio de Janeiro, 247 p. Disponible en <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/169149/1/Manual-de-metodos-de-analise-de-solo-2-ed-1997.pdf>
- Espinoza, IDN; Zenteno, MDC; Chávez, JC; Moreiral, VN; Solarte, KEA; Intriago, FLM. 2018. Propiedades físicas del suelo en diferentes sistemas agrícolas en la provincia de Los Ríos, Ecuador (en línea). *Temas agrarios*, 23(2):177-187. Disponible en <https://doi.org/10.21897/rta.v23i2.1301>
- FAO. 2016. Soil moisture and food security in tropical and subtropical agriculture (en línea). FAO, Roma. Disponible en <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstream/s/07bc7c6e-72e5-488d-b2f7-3c1499d098fb/content>
- Fatecha, DA. 2004. Clasificación de la fertilidad, acidez activa (pH) y necesidad de cal agrícola de los suelos de la región oriental del Paraguay. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción. Tesis como requisito para la obtención del título de Ingeniero Agrónomo. San Lorenzo, Paraguay.
- Ferreras, L; Toresani, S; Faggioli, V; Galarza, C. 2015. Sensibilidad de indicadores biológicos edáficos en un Argiudol de la Región Pampeana Argentina (en línea). *Revista Spanish Journal of Soil Science*, 5(3). Disponible en https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/bitstream/handle/20.500.12123/5173/INTA_CRCordoba_EEAMarcosJuarez_Faggioli_VS_Sensitivity_of_soil_biological_indicators.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Gómez, CN; Villagra-Mendoza, K; Solorzano-Quintana, M. 2018. La labranza mecanizada y su impacto en la conservación del suelo (revisión literaria) (en línea). *Tecnología en Marcha*, 31(1):170-180. Disponible en <http://dx.doi.org/10.18845/tm.v31i1.3506>
- González, AR; Porrúa, JA; Cañizares, JAM; Lamas, JG; Lazo, GC; Castro, JF. 2015. Los sistemas de labranza y su influencia en las propiedades físicas del suelo (en línea).

- Revista Ingeniería Agrícola, 5(2):55-60. Disponible en <https://www.redalyc.org/pdf/5862/586261425010.pdf>
- González, PJ; Fernández, D; Plana, R; Crespo, G. 2007. Efectos del antecedente cultural en las micorrizas nativas y la productividad del pasto brachiaria (*Brachiaria decumbens* cv. Señal) (en línea). Pastos y Forrajes, 30(1). Disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942007000100009
- Gysi, M; Maeder, V; Weiskopf, P. 2001. Pressure distribution underneath tires of agricultural vehicles (en línea). Transactions of the Asabe Journal, 44(6):1385-1389. Disponible en <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=7001>
- Hasanuzzaman, M; Bhuyan, MB; Nahar, K; Hossain, MS; Mahmud, JA; Hossen, MS; Masud, AAC; Moumita; Fujita, M. 2018. Potassium: A vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses (en línea). Agronomy, 8(3):31. Disponible en <https://doi.org/10.3390/agronomy8030031>
- Hatfield, JL; Sauer, TJ; Cruse, RM. 2017. Soil: the forgotten piece of the water, food, energy nexus (en línea). Advances in agronomy, 143:1-46. Disponible en <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.02.001>
- Jorajuría, D. 2001. Distribución vertical de la compactación del suelo bajo tráfico vehicular agrícola (en línea). Universidad Politécnica de Valencia, España. 350 p. Tesis Doctoral. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=245238>
- Jorajuría, D; Draghi, L. 2000. Sobrecompactación del suelo agrícola Parte I: Influencia del peso y del número de pasadas (en línea). Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, 4(3):445-452. Disponible en <https://doi.org/10.1590/S1415-43662000000300022>
- Lal, I. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security (en línea). Science 304: 1623-1627. Disponible en <https://doi.org/10.1126/science.1097396>
- Lampurlanés, J; Cantero-Martínez, C. 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth (en línea). Agronomy journal, 95(3):526-536. Disponible en <https://doi.org/10.2134/agronj2003.5260>
- Läuchli, A; Grattan, SR. 2012. Extremos del pH del suelo (en línea). En Fisiología del estrés vegetal, 194-209 p. Wallingford Reino Unido: CABI. Disponible en <https://doi.org/10.1079/9781845939953.0194>
- López, OE; González, E; de Llamas, PA; Molinas, AS; Franco, ED; García, S; Ríos, E. 1995. Reconocimiento de suelos y capacidad de uso de las tierras; Región Oriental. Paraguay (en línea). MAG/Dirección de Ordenamiento Ambiental. Proyecto de comercialización de Uso de la Tierra. Convenio 3445. P. Banco Mundial. 28 p. Disponible en <https://www.geologiadelparaguay.com/Estudio-de-Reconocimiento-de-Suelos-Regi%C3%B3n-Oriental-Paraguay.pdf>
- Llique, R; Guerrero, A. 2014. Influencia de la humedad de compactación en el comportamiento volumétrico de los suelos arcillosos (en línea). Revista Ciencia y Tecnología, 10(4):9-21. Disponible en <https://revistas.unitru.edu.pe/index.php/PGM/article/view/795>
- Manfreda, VT; Cogliatti, DH. 2006. Una escala alternativa para cuantificar la intensidad de la deficiencia de P en trigo (en línea). Agriscientia, 23(2):67-75. Disponible en http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1668-298X2006000200003&script=sci_arttext
- Mendes, WDC; Alves Júnior, J; Da Cunha, PC; Silva, ARD; Evangelista, AW; Casaroli, D. 2016. Potassium leaching in different soils as a function of irrigation depths (en línea). Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 20:972-977. Disponible en <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n11p972-977>
- Neina, D. 2019. The role of soil pH in plant nutrition and soil remediation (en línea). Applied and environmental soil science, 2019(1):5794869. Disponible en <https://doi.org/10.1155/2019/5794869>
- Osman, KT. 2013. Plant Nutrients and Soil Fertility Management (en línea). In: Soils. Springer, Dordrecht. Principles, properties and management, 129-159. Disponible en https://doi.org/10.1007/978-94-007-5663-2_10
- Puebla, JH. 2016. Efecto del exceso de humedad del suelo sobre el rendimiento en algunos cultivos de importancia agrícola en Cuba (en línea). Ingeniería Agrícola, 6(2):3-7. Disponible en <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/811>
- Römhald, V; Kirkby, EA. 2010. Research on potassium in agriculture: needs and prospects (en línea). Plant Soil 335:155-180. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0520-1>
- Solgi, A; Naghdi, R; Nikooy, M. 2015. Effects of skidder on soil compaction, forest floor removal and rut formation (en línea). Madera y bosques, 21(2):147-155. Disponible en https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712015000200010&script=sci_arttext
- Taboada, MA; Barbosa, OA; Cosentino, DJ. 2008. Null creation of air-filled structural pores by soil cracking and shrinkage in silty loamy soils (en línea). Soil Sci. 173:130-142. Disponible en https://journals.lww.com/soilsci/abstract/2008/02000/null_creation_of_air_filled_structural_pores_by.5.aspx
- Tedesco, MJ; Gianello, C; Bissani, CA; Bohnen, H; Volkweiss, SJ. 1995. Análise de solo, plantas e outros materiais 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 174 p. (Boletim Técnico, 5).
- Walter, A; Finger, R; Huber, R; Buchmann, N. 2017. Smart farming is key to developing sustainable agriculture (en línea). Proceedings of the National Academy of Sciences, 114(24):6148-6150. Disponible en <https://doi.org/10.1073/pnas.1707462114>
- Wang, Y; Lambers, H. 2020. Root-released organic anions in response to low phosphorus availability: recent progress, challenges and future perspectives (en línea). Plant and

Soil, 447(1-2):135-156. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11104-019-03972-8>
Yost, MA; Kitchen, NR; Sudduth, KA; Massey, RE; Sadler, EJ; Drummond, ST; Volkmann, MR. 2019. A long-term precision agriculture system sustains grain profitability (en línea). Precision Agriculture, 20:1177-1198. Disponible en <https://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/2551>

Artículo recibido en: 29 de febrero del 2024
Aceptado en: 09 de diciembre del 2024