



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**PROPAGACIÓN DE LA COMPACTACIÓN INDUCIDA POR LA
COSECHA MECÁNICA DE *Saccharum spp.* EN DOS SUELOS DEL
VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA**

Ing. Agr. Sebastian Saavedra Rincón. M.Sc.

Tesis

Para Optar al Grado de Ph.D en Ciencias Agrarias

Director:

Ing. Mec. Oscar Chaparro Anaya. M.Ed., Ph.D.
Profesor Titular

Línea de Investigación:

Manejo de Suelos y Aguas

Universidad Nacional De Colombia

Sede Palmira

Facultad de Ciencias Agropecuarias

Doctorado en Ciencias Agrarias

Palmira, Valle Del Cauca

2023

Integrantes del Jurado

Jurado 1: Agr. Jackson Adriano Albuquerque. Ph.D.

Jurado 2: Ing. Mec. Luis Arnoby Rodriguez Hurtado. Ph.D.

Jurado 3: Agr. Juan Carlos Menjivar Flores. Ph.D.

Dedicatoria

Dedico esta tesis doctoral con amor y gratitud a mis padres, cuyo legado sigue vivo en mi corazón. A mis hermanos, por su constante aliento. A Oscar Chaparro Anaya, por su guía invaluable. A la Universidad Nacional de Colombia, por la oportunidad. A Diana Medina Sanabria y Amapola, por su apoyo incondicional.

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional de Colombia. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

SEBASTIAN SAAVEDRA RINCON

Noviembre de 2023

RESUMEN GENERAL

PROPAGACIÓN DE LA COMPACTACIÓN INDUCIDA POR LA COSECHA MECÁNICA DE *Saccharum spp.* EN DOS SUELOS DEL VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA

El objetivo de la investigación fue analizar espacialmente en términos de resistencia mecánica a la penetración y densidad aparente en húmedo la compactación inducida ocasionada por la intensidad de tráfico durante la cosecha mecánica con vagones auto volteo de *Saccharum spp.* (caña de azúcar) en un suelo de textura arcillosa y un suelo de textura franca del municipio de Palmira en la región del Valle del Cauca.

Se revisaron los conceptos fundamentales de la compactación del suelo en la producción agrícola: la compactabilidad, la compresibilidad y las causas de la compactación, como el tránsito de maquinaria, así como los efectos del tráfico intenso en la compactación del suelo.

Se desarrolló un sistema de información geográfica portable que al ser probado mostró resultados teóricos válidos con un 99% de confianza en el método.

Se encontró que la propagación horizontal de la compactación aumentó con menores valores de densidad aparente en húmedo y se revirtió en el caso contrario, que intensidades de tráfico iguales o superiores a los 612.12 Mg.km/ha favorecieron la compactación en los niveles superficiales (< 30 cm de profundidad) y que la compactación se propaga en menor proporción sobre la dirección horizontal que sobre la dirección vertical.

También, se encontró que los esfuerzos transmitidos por la maquinaria elevaron los valores de densidad aparente en húmedo y la resistencia mecánica a la penetración por encima de los valores críticos para el desarrollo de la caña de azúcar.

Finalmente, se estableció una clara relación entre la intensidad de tráfico con la resistencia a la penetración y la densidad aparente en húmedo del suelo ($R^2 = 0.5$ y $\alpha = 0.05$) y se concluyó que, los resultados de la investigación demostraron que el tráfico durante las operaciones de cosecha mecanizada con vagones auto volteo ejercieron una influencia significativa en la magnitud y la distribución espacial de la compactación inducida, identificando como factores clave, el peso de la maquinaria, la presión de inflado de los neumáticos y las condiciones del suelo.

Palabras clave: Python, Suelo, Agricultura de Precisión, Agricultura Digital.

GENERAL ABSTRACT

PROPAGATION OF COMPACTION INDUCED BY MECHANICAL HARVESTING OF *Saccharum spp.* IN TWO SOILS OF VALLE DEL CAUCA, COLOMBIA

The objective of the research was to spatially analyze mechanical resistance to penetration and wet bulk density induced compaction caused by traffic intensity during the mechanical harvest with self-dumping wagons of *Saccharum spp.* (sugarcane) in clayey and loamy soils in the municipality of Palmira in the Valle del Cauca region.

Fundamental concepts of soil compaction in agricultural production were reviewed, including compactability, compressibility, and the causes of compaction such as machinery traffic, as well as the effects of heavy traffic on soil compaction.

A portable geographic information system was developed and, when tested, showed theoretically valid results with a 99% confidence level.

It was found that the horizontal spread of compaction increased with lower values of wet bulk density and reversed in the opposite case, that traffic intensities equal to or greater than 612.12 Mg.km/ha favored compaction at shallow levels (< 30 cm deep), and that compaction spreads to a lesser extent in the horizontal direction than in the vertical direction.

It was also found that the forces transmitted by machinery raised the values of wet bulk density and mechanical resistance to penetration above critical values for sugarcane development.

Finally, a clear relationship was established between traffic intensity and resistance to penetration and wet bulk density of the soil ($R^2 = 0.5$ and $\alpha = 0.05$), and it was concluded that the research results demonstrated that the intensity of traffic near and on the ground footprint during mechanized harvest operations with self-dumping wagons had a significant influence on the magnitude and spatial distribution of induced compaction, identifying key factors as machinery weight, tire inflation pressure, and soil conditions.

Keywords: Python, Soil, Precision Agriculture, Digital Agriculture.

CONTENIDO

Capítulo I.....	1
I. CONTEXTO	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivo general.....	2
1.3. Objetivos específicos	2
1.4. Organización de la tesis	2
1.5. Referencias.....	3
Capítulo II	5
II. COMPACTACIÓN DEL SUELO EN LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA: CONCEPTOS FUNDAMENTALES, CAUSAS Y EFECTOS.....	5
2.1. Introducción.....	5
2.2. Desarrollo.....	6
2.2.1. Generalidades de la compactación	6
2.2.2. Causas de la compactación.....	7
2.2.3. Impacto de la intensidad de tráfico sobre de la compactación	8
2.2.4. Métodos para la evaluación de la compactación	9
2.2.5. Estrategias de manejo para prevenir y remediar la compactación del suelo ..	10
2.3. Conclusiones.....	11
2.4. Referencias.....	11
Capítulo III.....	14
III. MAPEO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL EN AGRICULTURA DIGITAL: UNA HERRAMIENTA EN PYTHON	14
3.1. Introducción.....	14
3.2. Materiales y métodos	16
3.2.1. Desarrollo de la aplicación	16
3.2.2. Bases de datos de prueba	16
3.2.3. Análisis estadístico	17
3.3. Resultados.....	18
3.3.1. Aplicación.....	18
3.3.2. Análisis estadístico	18
3.4. Discusión.....	28
3.5. Conclusiones.....	28

3.6. Referencias.....	29
Capítulo IV	31
IV. COMPACTACIÓN INDUCIDA DURANTE LA COSECHA MECÁNICA DE <i>Saccharum spp.</i> : RELACIÓN CON PROPIEDADES ESTRUCTURALES DEL SUELO E INTENSIDAD DE TRÁFICO.....	31
4.1. Introducción.....	31
4.2. Materiales y métodos	33
4.2.1. Área de estudio	33
4.2.2. Operación de cosecha	33
4.2.3. Muestreo y variables de interés	34
4.2.4. Análisis de la información.....	35
4.3. Resultados.....	36
4.3.1. Análisis de la información – Lote A.....	36
4.3.2. Análisis de la información – Lote B.....	39
4.3.3. Relación IT, DaH y RP	42
4.3.4. Pruebas de compactación Proctor Estándar.....	43
4.4. Discusión.....	43
4.5. Conclusiones.....	47
4.6. Referencias.....	47
Capítulo V	50
V. COSECHA MÉCANICA DE <i>Saccharum spp.</i> CON VAGONES AUTO VOLTEO: CARACTERIZACIÓN DE LOS ESFUERZOS DE COMPRESIÓN Y SU RELACIÓN CON LA COMPACTACIÓN INDUCIDA.....	50
5.1. Introducción.....	50
5.2. Materiales y métodos	51
5.2.1. Desarrollo del sensor de esfuerzo de compresión	51
5.2.2. Área de estudio	52
5.2.3. Cargas y presiones de inflado y contacto	52
5.2.4. Muestreo y variables de interés	52
5.2.5. Análisis de la información.....	53
5.3. Resultados.....	54
5.3.1. Desarrollo del sensor de esfuerzo de compresión	54
5.3.2. Base de datos – Variables de interés.....	54
5.3.3. Análisis de la información.....	55

5.4. Discusión.....	57
5.5. Conclusiones.....	59
5.6. Referencias.....	61
Capítulo VI.....	63
VI. DISCUSIÓN GENERAL, CONCLUSIONES Y POSIBLES LINEAS DE INVESTIGACIÓN	63
6.1. Referencias.....	66

Lista de Figuras

Capítulo III

Figura 3.1. GeoStatLiteUN v2021.6.1 IGU – Ejemplo.....	18
Figura 3.2. Histograma (a), Q-Q plot (b) y regresión lineal multivariada (c) - variable dosis en la operación de fertilización mecánica.....	19
Figura 3.3. Histograma (a), Q-Q plot (b) y regresión lineal multivariada (c) - variable profundidad en la operación de roturación vertical.....	20
Figura 3.4. Semivariograma (a) y superficie continua Kriging (b) - variable dosis en la operación de fertilización mecánica.....	21
Figura 3.5. Semivariograma (a) y superficie continua Kriging (b) - variable profundidad en la operación de roturación vertical.....	23
Figura 3.6. Semivariograma (a) y superficie continua Kriging (b) SAGA GIS - variable dosis en la operación de fertilización mecánica.....	24
Figura 3.7. Semivariograma (a) y superficie continua Kriging (b) SAGA GIS - variable profundidad en la operación de roturación vertical.....	25
Figura 3.8. Modelos Kriging Ordinario: GeoStatLiteUN (a) y SAGA GIS (b) - variable dosis en la operación de fertilización mecánica.....	26
Figura 3.9. Modelos Kriging Ordinario: GeoStatLiteUN (a) y SAGA GIS (b) - variable profundidad en la operación de roturación vertical.....	27

Capítulo IV

Figura 4.1. Patrón de Navegación Abierto en Cosecha Mecánica.....	34
Figura 4.2. Distribución sitios de muestro y muestra de suelo.....	35
Figura 4.3. Modelos Kriging de superficie continua para DaH.....	38
Figura 4.4. Modelos Kriging de superficie continua RP promedio.....	39
Figura 4.5. Modelos Kriging de superficie continua para DaH.....	41
Figura 4.6. Modelos Kriging de superficie continua RP promedio.....	42
Figura 4.7. Densidad Aparente vs W% - Prueba Proctor.....	43

Capítulo V

Figura 5.1. Sensor de esfuerzo de compresión en calibración con máquina universal de ensayos.....	54
Figura 5.2. Cosechadora, tractor y vagón auto volteo.....	57
Figura 5.3. Transferencia de carga y dimensiones vagón auto volteo.....	58
Figura 5.4. Esfuerzos de compresión inducidos durante el tránsito de la maquinaria a tres profundidades.....	60

Lista de Tablas

Capítulo III

Tabla 3.1. Estadística descriptiva – variable dosis en la operación de fertilización mecánica.....	19
Tabla 3.2. Estadística descriptiva – variable profundidad en la operación de roturación vertical.....	20
Tabla 3.3. Geoestadísticos – variable dosis en la operación de fertilización mecánica.....	21
Tabla 3.4. Características estructurales del semivariograma ajustados y estadístico del modelo de superficie continua Kriging ordinario – variable dosis en la operación de fertilización mecánica.....	21
Tabla 3.5. Geoestadísticos – variable profundidad en la operación de roturación vertical.	22
Tabla 3.6. Características estructurales del semivariograma ajustados y estadístico del modelo de superficie continua Kriging ordinario – profundidad en la operación de roturación vertical.....	22
Tabla 3.7. Características estructurales del semivariograma Esférico ajustado por defecto en SAGA GIS y estadísticos del modelo de superficie continua Kriging ordinario – variable dosis en la operación de fertilización mecánica.....	23
Tabla 3.8. Características estructurales del semivariograma Exponencial ajustado por defecto en SAGA GIS y estadísticos del modelo de superficie continua Kriging ordinario – profundidad en la operación de roturación vertical.....	24
Tabla 3.9. Características estructurales de los semivariogramas Esféricos y estadísticos de los modelos de superficie continua Kriging ordinario - GeoStatLiteUN y SAGA GIS.....	25
Tabla 3.10. Intervalos de confianza para los modelos GeoStatLiteUN y SAGA GIS.....	26
Tabla 3.11. Características estructurales de los semivariogramas Esféricos y estadísticos de los modelos de superficie continua Kriging ordinario - GeoStatLiteUN y SAGA GIS.....	27
Tabla 3.12. Intervalos de confianza para los modelos GeoStatLiteUN y SAGA GIS.....	28

Capítulo IV

Tabla 4.1. Condiciones e intensidad de tráfico por tratamiento durante el experimento....	34
Tabla 4.2. Valores de IT por tratamiento.....	36
Tabla 4.3. Caracterización del suelo en el lote A.....	36
Tabla 4.4. Datos DaH y RP - Estadística descriptiva.....	37
Tabla 4.5. Análisis de Varianza – Datos DaH y RP.....	37
Tabla 4.6. Datos DaH y RP – Descriptivos por tratamiento.....	37
Tabla 4.7. Datos RP – Valores medios estratificados por tratamiento.....	38
Tabla 4.8. Caracterización suelo lote B	39
Tabla 4.9. Datos DaH y RP - Estadística descriptiva.....	40
Tabla 4.10. Análisis de Varianza – Datos DaH y RP.....	40
Tabla 4.11. Datos DaH – Descriptivos por tratamiento.....	40
Tabla 4.12. Datos RP – Valores medios estratificados por tratamiento.....	41
Tabla 4.13. Análisis de Varianza – Modelo de Regresión Lineal.....	42

Tabla 4.14. Estadísticos – Modelo de Regresión Lineal.....	42
--	----

Capítulo V

Tabla 5.1. Tratamientos del experimento.....	53
Tabla 5.2. Estadística descriptiva bases de datos – Suelo A y B.....	55
Tabla 5.3. Diferencias entre tratamientos: variable RP – Suelo A y B.....	56
Tabla 5.4. Esfuerzos máximos inducidos durante la operación de cosecha mecánica.....	56

Capítulo I

I. CONTEXTO

1.1. Introducción

El fenómeno de la compactación se origina por las altas cargas mecánicas que las máquinas transmiten al suelo durante su tráfico en las operaciones de la agricultura intensiva y ocasiona una reducción importante de la productividad de los sistemas agrícolas, al aumentar la resistencia mecánica a la penetración y la densidad aparente y disminuir la porosidad y la conductividad hidráulica de los suelos, afectando la disponibilidad de nutrientes y en general su calidad reduciendo el rendimiento de los cultivos a través del crecimiento atrofiado de las plantas sobre la superficie y un crecimiento reducido de sus raíces (Shah *et al.*, 2017).

Ferreira, *et al.* (2020) reportan que la compactación promovió la degradación de un suelo gestionado para el cultivo de soya y disminuyó su rendimiento entre un 12% a 19%.

Por su parte, Nunes, *et al.* (2019) expresan que en un cultivo de maíz la compactación fue uno de los factores más limitantes para el crecimiento profundo de las raíces.

En el cultivo de caña de azúcar la problemática no es diferente, Esteban *et al.* (2019) muestran que la compactación asociada a grandes intensidades de tráfico disminuyó hasta en un 18.5% la biomasa seca de raíces en un cultivo de caña de azúcar, lo que significó una pérdida de 10.3 Mg/ha en el rendimiento de la caña.

En síntesis, una de las principales amenazas antropogénicas a la calidad de los suelos para la agricultura es la compactación inducida (Torres *et al.*, 2017); la mayor contribución a la compactación inducida en los sistemas de producción agrícola se debe al uso indiscriminado de la maquinaria agrícola (Hamza y Anderson, 2005) y la consecución de la Seguridad Alimentaria a nivel mundial, nacional y local se ve amenazada por la degradación de los suelos (González-Cueto, *et al.*, 2009; FAO, *et al.*, 2020).

Las tecnologías de la información y comunicación como Python, aplicadas a la agricultura y combinadas con técnicas geoestadísticas como Kriging ordinario han mostrado ser métodos eficientes para determinar y mapear a gran escala la distribución espacial de las propiedades del suelo que ayudan a los agricultores y tomadores de decisiones a mejorar la gestión del suelo (Bhunia y Chattopadhyay, 2018).

Para el estudio de la compactación Cortez *et al.* (2018) mostraron que el Kriging ordinario fue eficiente para determinar la variabilidad espacial de la resistencia mecánica del suelo a la penetración a una profundidad de 30 cm y permitió identificar valores críticos y tomar decisiones de gestión.

En caña de azúcar (*Saccharum spp.*) Esteban *et al.* (2019) evidenciaron que el guiado automático (con trayectorias espaciales preestablecidas) durante la operación de cosecha mecánica da como resultado propiedades físicas más favorables para las plantas, lo que genera mayor biomasa de raíces y mayor rendimiento del cultivo.

Por su parte, Panziera *et al.* (2020) determinaron la distribución espacial de la densidad aparente y resistencia mecánica a la penetración hasta una profundidad de 100 cm en un suelo Oxisol bajo cultivo de caña de azúcar, identificaron valores críticos para el crecimiento de las raíces y generaron estrategias para mejorar las condiciones físicas del suelo.

En este sentido, Llevar a cabo una investigación sobre la distribución espacial de la compactación inducida en dos suelos del Valle del Cauca, Colombia es una aplicación del estudio de la dinámica del suelo, que permite generar nuevo conocimiento para entender como la intensidad de tráfico de las máquinas y uso de implementos agrícolas en el sistema agroindustrial de la caña de azúcar afectan las condiciones estructurales de los suelos (Gill & Vanden-Berg, 1967); y que, involucrar tecnologías y técnicas de la cuarta revolución industrial permite generar estrategias de gestión para recopilar, procesar y analizar datos espaciales de los agroecosistemas “para mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agraria” (Liu *et al.*, 2020).

1.2. Objetivo general

Analizar espacialmente en términos de resistencia mecánica a la penetración y densidad aparente en húmedo, la compactación inducida ocasionada por la intensidad de tráfico durante la cosecha mecánica con vagones auto volteo de caña de azúcar, en un suelo de textura arcillosa y un suelo de textura franca del municipio de Palmira en la región del Valle del Cauca.

1.3. Objetivos específicos

- Caracterizar espacialmente la compactación inducida ocasionada por las intensidades de tráfico durante la cosecha mecánica de caña de azúcar con vagones auto volteo, en un suelo de textura arcillosa y un suelo de textura franca del municipio de Palmira en la región del Valle del Cauca, Colombia.
- Caracterizar los esfuerzos verticales transmitidos por las intensidades de tráfico ocasionadas durante la cosecha mecánica de caña de azúcar con vagones auto volteo, en una porción de un suelo de textura arcillosa y una porción de un suelo con textura franca del municipio de Palmira en la región del Valle del Cauca, Colombia.
- Relacionar la compactación inducida con la intensidad de tráfico ocasionada durante la cosecha mecánica de caña de azúcar con vagones auto volteo, en un suelo con textura arcillosa y un suelo de textura franca del municipio de Palmira en la región del Valle del Cauca.

1.4. Organización de la tesis

En el **Capítulo I**, se abordó la introducción del tema de investigación y se describieron los objetivos tanto general como específicos. En el **Capítulo II** se examinaron los conceptos fundamentales de la compactación del suelo en la producción agrícola: la compactabilidad, la compresibilidad y las causas de la compactación, como el tránsito de maquinaria, así como los efectos del tráfico intenso en la compactación del suelo. Los **capítulos III a V**, comprendieron el desarrollo específico del tema de investigación, cada uno estructurado con introducción, materiales y métodos, resultados, discusión, conclusiones y referencias. En el **Capítulo III** se desarrolló un sistema de información geográfica portable que al ser probado mostró resultados teóricos válidos con un 99% de confianza en el método. En el **Capítulo IV** se caracterizó la compactación inducida durante la cosecha con vagones auto volteo, en términos de resistencia mecánica a la penetración y densidad aparente en húmedo considerando su variabilidad espacial. Se encontró que la propagación horizontal de la compactación aumentó con menores valores de densidad aparente en húmedo y se revirtió en el caso contrario, que intensidades de tráfico iguales o superiores a los 612.12 Mg.km/ha favorecieron la compactación en los niveles superficiales (< 30 cm de profundidad) y que la compactación se propaga en menor proporción sobre la dirección horizontal que sobre la dirección vertical. En el

Capítulo V se caracterizó los esfuerzos verticales transmitidos al suelo por la maquinaria durante la operación de cosecha mecánica con vagones auto volteo. Se encontró que los esfuerzos transmitidos por la maquinaria elevaron los valores de densidad aparente en húmedo y la resistencia mecánica a la penetración por encima de los valores críticos para el desarrollo de la caña de azúcar. Finalmente, En el **Capítulo VI** se estableció una clara relación entre la intensidad de tráfico, medida en magnitudes de intensidad y presiones de contacto, con la resistencia a la penetración y la densidad aparente en húmedo del suelo. Se concluye que, los resultados de la experimentación demostraron que el tráfico durante las operaciones de cosecha mecanizada con vagones auto volteo ejercieron una influencia significativa en la magnitud y la distribución espacial de la compactación inducida, identificando como factores clave, el peso de la maquinaria, la presión de inflado de los neumáticos y las condiciones del suelo.

1.5. Referencias

- Bhunja, G. S., Shit, P. K., y Chattopadhyay, R. 2018. Assessment of spatial variability of soil properties using geostatistical approach of lateritic soil (West Bengal, India). *Annals Of Agrarian Science*, 16(4), 436-443. <https://doi.org/10.1016/j.aasci.2018.06.003>
- Cortez, J. W., Matos, W. P. D. S., Arcoverde, S. N., Cavassini, V. H., y Valente, I. Q. 2018. Spatial variability of soil resistance to penetration in no tillage system. *Engenharia Agrícola*, 38, 697-704. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v38n5p697-704/2018>
- Esteban, D. A. A., de Souza, Z. M., Tormena, C. A., Lovera, L. H., de Souza Lima, E., de Oliveira, I. N., y de Paula Ribeiro, N. 2019. Soil compaction, root system and productivity of sugarcane under different row spacing and controlled traffic at harvest. *Soil and Tillage Research*, 187, 60-71. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.11.015>
- FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF. 2020. El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2020. Transformación de los sistemas alimentarios para que promuevan dietas asequibles y saludables. Roma, FAO. <https://doi.org/10.4060/ca9692es>
- Ferreira-Lira, AL., Araújo-da Silva, K., Sales-Rodrigues, M., Pereira-Souza, CG., Ramos-Moreira, FB., Nascimento-Lima, AM. 2021. Spatial correlation between soil and leaf macronutrients in semiarid Brazilian mango (*Mangifera indica* L.) fields. *Rev. Bras. Frutic.*, 43(4). <https://doi.org/10.1590/0100-29452021149>
- Gill, W., y Vanden-Berg, G. 1967. Soil dynamics in tillage and traction (No. 316). Agricultural Research Service, US Department of Agriculture. <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT10309639/PDF>
- González-Cueto, O., Iglesias-Coronel, C., y Herrera-Suárez, M. 2009. Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 18(2), 57-63. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93215937011>
- Hamza, MA., y Anderson, WK. 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*. 82(2), 121-145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Liu, Y., Ma, X., Shu, L., Hancke, G. P., y Abu-Mahfouz, A. M. 2020. From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6), 4322-4334. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3003910>
- Nunes, M. R., Karlen, D. L., Denardin, J. E., y Cambardella, C. A. 2019. Corn root and soil health indicator response to no-till production practices. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 285, 106607. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106607>

- Panziera, W., de Lima, C. L. R., Moura-Bueno, J. M., Pauletto, E. A., SILVA, S. D. A., Timm, L. C., y Stumpf, L. 2020. Spatial variability of soil physical attributes in sugarcane using different row spacings. *Australian Journal of Crop Science*, 14(9), 1399-1404. <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.09.p2394>
- Shah, A.N., Tanveer, M., Shahzad, B. *et al.* 2017. Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview. *Environ Sci Pollut Res*, 24, 10056–10067. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8421-y>
- Torres, J., Gutierrez, JA., y Beltran, HA. 2017. Compactación, Una de las causas más comunes de la degradación del suelo. *Revista Ciencias Agropecuarias*, 3(3), 18-22. http://revistas.ucundinamarca.edu.co/index.php/Ciencias_agropecuarias/article/view/225

Capítulo II

II. COMPACTACIÓN DEL SUELO EN LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA: CONCEPTOS FUNDAMENTALES, CAUSAS Y EFECTOS

Resumen

La revisión se centró en la compactación del suelo en la producción agrícola; se exploraron los conceptos fundamentales relacionados con la compactación del suelo, incluyendo la compactabilidad y la compresibilidad. Además, se analizó las causas de la compactación, en particular, el impacto del tráfico de maquinaria agrícola. También se examinó los efectos adversos de la compactación del suelo en el crecimiento y desarrollo de las plantas. Se destacó la importancia de comprender y abordar la compactación del suelo en la agricultura, ya que es un factor crucial para el éxito de los cultivos y la sostenibilidad agrícola.

Palabras clave: Tránsito de maquinaria, compresibilidad, compactabilidad, intensidad de tráfico.

2.1. Introducción

La compactación en los suelos agrícolas es una de las principales amenazas antropogénicas a la calidad de los suelos para la agricultura a nivel global, que puede comprometer la seguridad alimentaria y el desarrollo económico y social (FAO *et al*, 2022). La compactación se produce cuando las condiciones en la interacción máquina-suelo son inadecuadas y puede reducir la infiltración del agua, el movimiento del aire, disminuir la permeabilidad del suelo y dificultar el crecimiento de los cultivos. El uso indiscriminado de la maquinaria en el proceso de mecanización agrícola es una de las principales causas de la compactación (Martínez Ramírez *et al*, 2023).

Para abordar este problema, se pueden utilizar tecnologías y técnicas de la cuarta revolución industrial, como sensores, sistemas de información geográfica y aprendizaje automático, entre otros. Estas tecnologías pueden ayudar a monitorear y evaluar la compactación del suelo, así como a desarrollar planes de manejo adecuados para prevenirla y mitigar sus efectos negativos. Además, pueden mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, reducir el impacto ambiental y aumentar la rentabilidad para los agricultores (Qin *et al*, 2022).

En Colombia, se apuesta por estrategias para promover la producción sostenible y la seguridad alimentaria, y es necesario aumentar la inversión en el sector agrícola hacia la provisión de bienes y servicios para una modernización del campo¹. En el Valle del Cauca, se encuentra uno de los sistemas productivos agroindustriales más tecnificados del país, el cual permite llevar a cabo trabajos de investigación sobre la compactación inducida por el tránsito de maquinaria pesada en el suelo durante las operaciones mecanizadas.

¹ Plan Nacional de Desarrollo de Colombia 2022 – 2026 “Colombia, potencia mundial de la vida”. Disponible en <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/portalDNP/PND-2023/2023-05-04-bases-plan-nacional-de-inversiones-2022-2026.pdf>

2.2. Desarrollo

2.2.1. Generalidades de la compactación

La compactación es un estado físico del suelo en el cual la masa de suelo es tan densa que brinda condiciones de espacios vacíos o porosidad que pueden llegar a limitar el crecimiento y desarrollo de las plantas. Los factores naturales que propician la compactación están relacionados con la textura y la humedad; que influyen directamente sobre las propiedades mecánicas de compresibilidad y compactabilidad (Cueto *et al.*, 2009).

La compactabilidad de un suelo se refiere a la máxima densidad aparente que puede alcanzar cuando se somete a una cantidad de energía determinada (Luciano *et al.*, 2012). Esta propiedad está estrechamente relacionada con el contenido de humedad presente en el suelo. De hecho, la compactabilidad del suelo aumenta a medida que se incrementa su contenido de humedad, lo que significa que la máxima densidad aparente que puede ser comprimida con una determinada cantidad de energía (presión de compactación) se incrementa cuando se añade agua al suelo. Cabe destacar que, para un suelo dado, existe un único nivel de humedad (humedad crítica) en el rango de cero a saturación, en el cual se puede lograr la máxima densidad para una determinada presión de compactación (Cueto *et al.*, 2009).

La compresibilidad del suelo está directamente relacionada con su índice de compresión, que indica la variación del índice de vacíos de un suelo en función de la variación de la presión de compactación que está soportando; en otras palabras, cuanto mayor sea la compresibilidad de un suelo, mayor será su índice de compresión y, por lo tanto, mayor será la variación del índice de vacíos en respuesta a una variación de la presión de compactación (Håkansson y Lipiec, 2000; Koolen y Kuipers, 2012). La compresibilidad está íntimamente relacionada con la textura del suelo; Botta y Draghi (2002) expresan que los suelos con altos contenidos de arcilla son más susceptibles a la compactación que los suelos con altos contenidos de arena, a su vez, los suelos sueltos (porosidades altas) lo son más que los que pasaron por un proceso de compactación.

La compactabilidad y la compresibilidad son indicadores complementarios de la susceptibilidad de un material a la compactación. La primera se refiere a la máxima densidad que puede alcanzarse bajo una energía de compresión específica y un contenido de humedad determinado (Luciano *et al.*, 2012), mientras que la segunda se refiere a la velocidad con la que se alcanza dicha densidad máxima cuando se somete a esfuerzos de compresión. En síntesis, estos términos proporcionan información crucial acerca de la magnitud y la facilidad con la que un material puede ser compactado (Håkansson y Lipiec, 2000; Koolen y Kuipers, 2012).

Conviene aclarar, que la densificación en los suelos puede lograrse de dos maneras: la primera, de índole natural, se conoce como consolidación y es un proceso lento que ocurre en suelos saturados en ausencia de cargas mecánicas externas, que provoca la disminución del volumen del suelo e incrementa la magnitud del esfuerzo cortante que es capaz de soportar, debido a que el agua que ocupa los poros fluye hacia el exterior; la segunda, de índole antrópico, se conoce como compactación y es un proceso rápido que ocurre en suelo no saturados por el efecto de cargas mecánicas externas, que contribuye a incrementar la resistencia del suelo y a disminuir su permeabilidad, como consecuencia de la densificación por la expulsión del agua y aire presente en los poros (Duque Escobar y Escobar Potes, 2002).

Indudablemente, para aplicaciones civiles, la consolidación y compactación son fenómenos favorables, pero para la agricultura son fenómenos adversos que limitan los procesos productivos agrícolas.

Uno de los primeros reportes documentados acerca del fenómeno de la compactación se puede encontrar implícito en el libro “*Éléments de l'agriculture, ou méthode de faire valoir toutes*

sortes de terres” del agrónomo francés Henri Louis Duhamel du Monceau en su capítulo titulado “De la manière de labourer la terre ” cuya edición original fue publicada en 1750 por la editorial Saillant & Nyon en la ciudad de París. En este capítulo, el autor explica la importancia de la labranza para preparar la tierra para la siembra y la necesidad de adaptar la labranza a las diferentes condiciones del suelo y el terreno, describe las herramientas utilizadas para labrar la tierra, incluyendo arados y rastras y cómo deben ser ajustadas para un mejor rendimiento. También detalla la importancia de la profundidad y la dirección del corte en la tierra, y cómo esto puede afectar el crecimiento de las plantas.

A la fecha, la compactación continúa siendo un fenómeno global importante que mitigar en la agricultura. En África, la causa de la compactación es la presión ejercida por la maquinaria pesada sobre el suelo en las operaciones de mecanización. En Asia, ha incrementado la compactación por la mecanización en tierras de cultivo y el pisoteo del ganado. En Europa, la causa que amenaza todas las áreas agrícolas son el tráfico intenso de maquinaria pesada. Y en América Latina, la compactación es causada por el sobrepastoreo y el alto tráfico de maquinaria pesada durante las operaciones de mecanización agrícola (FAO y GTIS, 2015).

2.2.2. Causas de la compactación

Las causas de la compactación en los suelos agrícolas están asociadas a: la circulación de maquinarias y vehículos agrícolas, especialmente cuando se realiza en condiciones de humedad elevada; la labranza intensiva con maquinaria pesada que puede compactar las capas superficiales del suelo y reducir su porosidad y permeabilidad; las lluvias intensas que pueden comprimir las capas superficiales; y a la eliminación de la cobertura vegetal (Torres *et al.*, 2017).

El tránsito de maquinaria pesada, como tractores, cosechadoras, arados, sembradoras, entre otros, puede causar compactación del suelo agrícola debido a la carga que ejerce sobre la superficie del suelo. Cuando los neumáticos o las orugas de una maquinaria agrícola se mueven sobre el suelo, generan una fuerza que se transfiere al suelo a través de las capas superficiales. Esta fuerza puede ser mayor que la resistencia del suelo, lo que provoca la compresión y deformación de este.

El físico francés Charles-Augustin de Coulomb en 1776, describió en una ecuación (2.1) como los esfuerzos cortantes máximos (de deformación o fallo) del suelo dependen de las condiciones físicas del suelo (textura, estructura y humedad) y las cargas normales a las que se somete.

$$\tau_{\text{máx}} = c + \sigma_{\text{crítico}} * \tan\Theta \quad (2.1)$$

Donde: $\tau_{\text{máx}}$ hace referencia al esfuerzo cortante máximo, c hace referencia a la cohesión del suelo, $\sigma_{\text{crítico}}$ hace referencia al esfuerzo normal sobre el suelo y Θ hace referencia al ángulo de fricción interno suelo-suelo.

Más adelante, el geólogo australiano John C. Micklethwaite en 1893, sostuvo que la fuerza aplicada por los neumáticos o las orugas de una máquina sobre el suelo se distribuye en una zona de deformación que se extiende hacia el interior del suelo desde la superficie y que el proceso de compactación comienza cuando la fuerza aplicada por la maquinaria sobre el suelo supera la capacidad de resistencia del suelo. Esto produce una deformación en la zona de contacto, que puede dar lugar a la expulsión de agua y aire desde los poros del suelo, lo que aumenta la densidad y la compactación de este. En este sentido, complementa la ecuación de Coulomb y dio lugar lo que se conoce como la ecuación (2.2) de la teoría de la tracción.

$$H_{\text{máx}} = cA + Q_{\text{crítico}} \cdot \tan\Theta \quad (2.2)$$

Donde: $H_{\text{máx}}$ hace referencia a la fuerza de corte antes que se deforme el suelo, c hace referencia a la cohesión del suelo, $Q_{\text{crítico}}$ hace referencia a la carga que ocasiona la deformación del suelo y Θ hace referencia al ángulo de fricción interno suelo-suelo.

La teoría de la tracción de Micklethwaite es una de las varias teorías que se han propuesto para explicar la compactación del suelo por el tránsito de maquinaria. Sin embargo, esta teoría es ampliamente reconocida y utilizada en el campo de la ciencia del suelo y la agronomía, y ha sido objeto de numerosos estudios e investigaciones en todo el mundo (Gill y Vanden Berg, 1967).

El impacto del tránsito de maquinaria en la compactación del suelo puede variar según factores como el tipo de suelo, la humedad, la frecuencia y la intensidad del tránsito, entre otros. Por lo tanto, es fundamental tomar medidas para prevenir y minimizar la compactación del suelo.

2.2.3. Impacto de la intensidad de tráfico sobre de la compactación

En un estudio llevado a cabo por Rodríguez y Valencia (2012), se encontró una relación entre la compactación del suelo y la cosecha mecánica de caña de azúcar, atribuida a la intensidad del tráfico causado por los equipos durante la labor. Se descubrió que la entrada de vagones pesados al campo llevó a sobrepasar los límites de carga por eje para evitar la compactación en el subsuelo. En un suelo Typic Haplusters de textura arcillosa y con un contenido de agua promedio del 21%, se midió la resistencia mecánica a la penetración antes de la cosecha y a 20 cm de profundidad, que fue de 2 MPa y de 3,3 MPa a 80 cm; después de la cosecha, la resistencia a la penetración alcanzó valores muy altos de 5,3 MPa. En consecuencia, la cosecha con vagones más livianos y de menor capacidad se identificó como una solución para reducir la compactación tanto superficial como subsuperficial del suelo. Además, con el manejo adecuado, esta práctica puede garantizar un menor consumo de combustible y una reducción en la cantidad de emisiones emitidas hacia la atmósfera.

En un estudio realizado por Mur y Balbuena (2014), se encontró que las intensidades de tráfico de 200 Mg.km/ha elevan la resistencia mecánica a la penetración (0,9 MPa) por encima del límite en un Argiudol típico, lo que provoca una disminución en el rendimiento de materia seca de una pradera. El pasaje repetitivo de tractores de baja masa por eje en una misma senda induce cambios temporales en las propiedades físicas del suelo evaluadas a nivel superficial y subsuperficial, siendo más pronunciados en los primeros estratos del suelo. La resistencia a la penetración resulta ser un parámetro más sensible para identificar modificaciones en el estado físico del suelo como resultado del tráfico vehicular. El uso de tractores de bajo peso por eje en los sistemas de cosecha de forrajes se ha identificado como una alternativa que reduce, aunque no elimina, los efectos adversos del tráfico sobre la impedancia mecánica del suelo y la productividad de la pradera.

En un estudio llevado a cabo por Martiren *et al.* en 2016, se descubrió que el uso de un equipo pesado (187 kN) para la siembra directa de *Zea mayz* L. (maíz) en un Argiudol típico provocó una compactación en el subsuelo, lo que se evidenció a través de un índice de cono superior a 2.5 MPa a una profundidad de 45 cm. Estos cambios en el subsuelo llevaron a modificaciones en el sistema de raíces del maíz, pero no produjeron beneficios significativos en su rendimiento. Por lo tanto, es importante tener en cuenta la utilización de equipos más livianos para

evitar la compactación del suelo, lo que puede resultar en una mejora en el crecimiento y desarrollo del maíz, y, en última instancia, en su rendimiento.

Shaheb *et al.* (2021) concluyen que el uso de maquinaria pesada para operaciones como la labranza, siembra, mantenimiento del cultivo y cosecha puede causar compactación del suelo. Estas operaciones en el campo con maquinaria de alto peso pueden dañar la estructura del suelo y el ambiente que son críticos para la producción sostenible de cultivos, lo que reduce el crecimiento y rendimiento de los cultivos. La compactación del suelo también afecta la arquitectura y el anclaje de las raíces de las plantas, reduciendo la absorción de nutrientes, el crecimiento y la biomasa de las plantas y el rendimiento del cultivo. Además, la compactación del suelo resultante de los múltiples pasos de maquinaria pesada con diversas combinaciones de carga de ruedas y presión sobre el suelo.

2.2.4. Métodos para la evaluación de la compactación

La compactación del suelo en la agricultura, un problema común que puede afectar negativamente el rendimiento de los cultivos, se evalúa mediante pruebas físicas, como las pruebas de penetración y la medición de la densidad aparente y la porosidad del suelo; estas evaluaciones proporcionan datos cuantitativos esenciales para comprender el estado del suelo y tomar medidas adecuadas; de esta manera, es posible prevenir o mitigar la compactación y, al hacerlo, mantener la salud y la productividad del suelo agrícola (Gueçaimburu *et al.*, 2019).

La densidad aparente del suelo es un parámetro clave para evaluar la compactación, y para determinarla, se extrae una muestra de suelo y se mide su peso seco y el volumen que ocupa; esta medición proporciona una indicación de la cantidad de partículas de suelo presentes en un determinado volumen, y valores más altos de densidad aparente suelen estar asociados con una mayor compactación del suelo, ya que indican una mayor cantidad de partículas por unidad de volumen (Robinson *et al.*, 2022).

Se recurre a la resistencia a la penetración como un método esencial en la evaluación de la compactación de los suelos agrícolas, utilizando instrumentos como el penetrómetro o el cono de penetración para medir la fuerza requerida para insertar una punta en el suelo; esto se convierte en un indicador claro de la compactación, ya que en suelos compactados se necesita más fuerza para lograr la penetración en comparación con los suelos no compactados; en este sentido, cuando se observan valores elevados de resistencia a la penetración, es señal de una mayor compactación y, además, puede indicar la presencia de capas endurecidas en el suelo (Wang *et al.*, 2022).

Las recomendaciones específicas para evaluar la resistencia a la penetración del suelo y abordar la compactación en los sistemas agrícolas son proporcionadas por la American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE) en su documento titulado "ASAE Standards S313.3: Soil Cone Penetration Testing". Este documento establece las pautas y procedimientos recomendados para realizar mediciones de resistencia a la penetración del suelo, así como para interpretar y utilizar los resultados obtenidos.

Existen varios métodos adicionales para estimar la compactación del suelo. Por ejemplo, la conductividad eléctrica aparente (CEa) se emplea como una medida indirecta de la compactación, ya que los suelos compactados presentan una mayor conductividad eléctrica debido a su menor porosidad (Martínez Rodríguez *et al.*, 2011). Otra aproximación consiste en evaluar la tasa de infiltración del agua, la cual disminuye en suelos compactados debido a la menor porosidad (Vaca García *et al.*, 2014); por ejemplo, en suelos de arenosos cuyas partículas son gruesas, existen espacios amplios entre partículas que facilita la infiltración del agua (Úbeda Rivera & Delgado Dallatorre, 2018). Además, el análisis de imágenes digitales puede ser útil para detectar áreas

compactadas al identificar características como grietas o agregados de suelo (Huerta-Olague *et al.*, 2018).

Según el estudio llevado a cabo por Martínez Rodríguez *et al.* (2011) sobre el suelo ferralítico rojo compactado, se encontró que existe una relación directa entre la humedad del suelo y la conductividad eléctrica. Además, se observó que a medida que aumenta el grado de compactación del suelo, medido mediante la densidad aparente, se produce un incremento en la conductividad eléctrica y, por consiguiente, en el voltaje inducido.

La combinación de los métodos anteriores, en el contexto de la agricultura de precisión, brinda una evaluación más completa y precisa de la compactación del suelo; al aprovechar las tecnologías y herramientas disponibles en la agricultura de precisión, como: la teledetección, los sistemas de información geográfica y los sensores de campo; los agricultores y profesionales del agro pueden obtener una visión detallada de la distribución espacial de la compactación del suelo; esto les permite identificar y abordar de manera más precisa las áreas problemáticas, implementar prácticas de manejo específicas en cada zona y optimizar los recursos para mejorar la calidad del suelo y el rendimiento de los cultivos (Shaikh & Lone, 2022).

2.2.5. Estrategias de manejo para prevenir y remediar la compactación del suelo

El manejo adecuado de la compactación del suelo es fundamental para preservar la calidad del suelo y optimizar el rendimiento de los cultivos. Para lograrlo, se recomienda considerar los siguientes aspectos:

Contenido de humedad al momento de las operaciones mecanizadas: realizar el tráfico de máquinas en suelos secos o con bajos contenidos de humedad ayuda a evitar la compactación. Los suelos con bajos contenidos de humedad son más resistentes a la compactación bajo una presión dada. Se sugiere que la humedad del suelo durante las labores agrícolas sea inferior al límite plástico (Keller, 2004).

Peso de la maquinaria: limitar el peso concentrado sobre la superficie del suelo ayuda a mitigar la compactación. Distribuir múltiples ruedas individualmente debajo de la maquinaria, utilizar ruedas duales o utilizar orugas puede ayudar a reducir la concentración de peso sobre el suelo (Silva *et al.*, 2018).

Presiones de contacto: utilizar maquinaria de bajo peso con presiones de inflado bajas en las ruedas ayuda a reducir la presión de contacto con el suelo. Esto limita la propagación de la compactación en profundidad y facilita el incremento de la porosidad con operaciones de labranza (Silva *et al.*, 2018).

Tráfico controlado: con la ayuda de los sistemas de información geográfica se puede garantizar que la maquinaria transite por caminos determinados y que no se afecten superficies de suelo adyacentes (cuando se garantice un ancho de camino suficiente), permitiendo disminuir la propagación de la compactación dentro de un lote de cultivo. Por ejemplo, de Sousa *et al.* (2017) en un cultivo de caña de azúcar, obtuvieron una mayor porosidad en la cama de semillas en los tratamientos de mecanización que contaron con piloto automático.

Incrementar la velocidad de avance de la maquinaria: el incremento de la velocidad de movimiento de la maquinaria agrícola disminuye la compactación debido al menor tiempo de permanencia de la carga sobre el suelo. Alakukku *et al.* (2003), reportaron el efecto de la velocidad en las tensiones máximas bajo el centro de una rueda, en un suelo franco arenoso, encontrando que un incremento de velocidad de 2 a 10 km/h provocó el decrecimiento de las presiones, en 0.3 m de profundidad bajo el centro del neumático y que el efecto de la velocidad fue mayor en un suelo suelto que en uno denso. En este sentido, un incremento en la velocidad reduce las tensiones que

se transmiten a la capa superior del suelo. Por otra parte, Carman (2002), encontró que “al duplicar la velocidad de movimiento se causó un 6% de decrecimiento en el hundimiento del suelo y que la resistencia a la compresión, la densidad de volumen, y el índice de compactación disminuyeron con el incremento de la velocidad de avance”.

2.3. Conclusiones

La compactación del suelo es un fenómeno adverso que limita el crecimiento y desarrollo de las plantas en la agricultura. Está influenciada por factores naturales como la textura y la humedad del suelo, así como por actividades humanas como el tránsito de maquinaria pesada.

La compactabilidad y la compresibilidad son propiedades que indican la facilidad con la que un suelo puede ser compactado y la velocidad a la que alcanza su densidad máxima bajo compresión.

El tráfico de maquinaria pesada en la agricultura, como tractores y cosechadoras, es una de las principales causas de compactación del suelo. La carga ejercida por estos equipos sobre la superficie del suelo puede superar la resistencia del suelo, lo que resulta en la compresión y deformación de este.

La intensidad del tráfico, el tipo de suelo, la humedad y otros factores influyen en el impacto de la compactación. Se han encontrado soluciones para reducir la compactación, como el uso de maquinaria más liviana y de menor capacidad, así como la implementación de prácticas de manejo adecuadas.

La compactación del suelo puede tener efectos negativos en la productividad de los cultivos al afectar la resistencia mecánica a la penetración y la arquitectura de las raíces, lo que resulta en una disminución del rendimiento del cultivo. Es importante tomar medidas para evitar y mitigar la compactación del suelo en la agricultura.

2.4. Referencias

- Alakukku, L., Weisskopf, P., Chamen, W. C. T., Tijink, F. G. J., Van Der Linden, J. P., Pires, S., ... & Spoor, G. (2003). Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review: Part 1. Machine/soil interactions. *Soil and tillage research*, 73(1-2), 145-160. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00107-7](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00107-7)
- Botta, G. F., Jorajuria, D., & Draghi, L. M. (2002). Influence of the axle load, tyre size and configuration on the compaction of a freshly tilled clayey soil. *Journal of Terramechanics*, 39(1), 47-54. [https://doi.org/10.1016/S0022-4898\(02\)00003-4](https://doi.org/10.1016/S0022-4898(02)00003-4)
- Carman, K. (2002). Compaction characteristics of towed wheels on clay loam in a soil bin. *Soil and tillage research*, 65(1), 37-43. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00281-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00281-1)
- Cueto, O. G., Coronel, C. E. I., & Suárez, M. H. (2009). Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(2), 57-63. <https://www.redalyc.org/pdf/932/93215937011.pdf>
- de Sousa, A. C. M., de Souza, Z. M., Claret, R. M. P., & Torres, J. L. R. (2017). Traffic control with autopilot as an alternative to decrease soil compaction in sugarcane areas. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20(1). <https://www.revista.cbba.uady.mx/ojs/index.php/TSA/article/view/2283>
- Duque Escobar, G y Escobar Potes, C. (2002). Mecánica de los suelos. Universidad Nacional De Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/3375>

- FAO y GTIS. (2015). Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS) – Resumen Técnico. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura y Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo, Roma, Italia. <https://www.fao.org/3/i5126s/i5126s.pdf>
- FAO, FIDA, OMS, PMA y UNICEF. (2022). El estado de la seguridad alimentaria y la nutrición en el mundo 2022. Adaptación de las políticas alimentarias y agrícolas para hacer las dietas saludables más asequibles. Roma, FAO.
- Gill, W. R., & Vanden Berg, G. E. (1967). Soil dynamics in tillage and traction (No. 316). Agricultural Research Service, US Department of Agriculture.
- Gueçaimburu, J. M., Vázquez, J. M., Tancredi, F., Reposo, G. P., Rojo, V., Martínez, M., & Introcaso, R. M. (2019). Evolución del fósforo disponible a distintos niveles de compactación por tráfico agrícola en un argiudol típico. *Chilean journal of agricultural & animal sciences*, 35(1), 81-89. <http://dx.doi.org/10.4067/S0719-38902019005000203>
- Håkansson, I., y Lipiec, J. (2000). A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil and Tillage Research*, 53(2), 71-85. <https://doi.org/10.4060/cc0639es>
- Huerta-Olague, J. D. J., Oropeza Mota, J. L., Guevara Gutiérrez, R. D., Ríos Berber, J. D., Martínez Menes, M. R., Barreto García, O. A., ... & Mancilla Villa, O. R. (2018). Efecto de la cobertura vegetal de cuatro cultivos sobre la erosión del suelo. *Idesia (Arica)*, 36(2), 153-162. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292018005000701>
- Keller, T.: Soil compaction and soil tillage studies in agricultural soil mechanics, Tesis (en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas), Universidad Sueca de Ciencias Agrícolas, Uppsala, Suecia, 2004. https://pub.epsilon.slu.se/673/1/TK_Agraria_489.pdf
- Koolen, A. J., y Kuipers, H. (2012). Agricultural soil mechanics (Vol. 13). Springer Science & Business Media. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-69010-5>
- Luciano, R. V., Albuquerque, J. A., Costa, A. da ., Batistella, B., & Warmling, M. T.. (2012). Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no Sul do Brasil. *Revista Brasileira De Ciência Do Solo*, 36(6), 1733–1744. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600007>
- Martínez Ramírez, R., García Ruiz, I., María Rodríguez, M., & Gallego Domínguez, R. (2023). Efecto del tráfico en suelos Ferralíticos de dos tecnologías de cosecha de caña de azúcar. *Revista Ingeniería Agrícola*, 13(1). <https://rcta.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/1670>
- Martínez Rodríguez, A., Rodríguez Pérez, R., & Pérez Sendín, A. (2011). Sensoramiento del estado de compactación del suelo mediante un campo magnético variable. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(1), 25-30. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542011000100005&lng=es&tlng=en
- Martínez Rodríguez, A., Rodríguez Pérez, R., & Pérez Sendín, A. (2011). Sensoramiento del estado de compactación del suelo mediante un campo magnético variable. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 20(1), 25-30. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542011000100005&lng=es&tlng=en
- Martiren, V. S., Fonterosa, R. A., Lastra-Bravo, X. B., & Botta, G. F. (2016). Compactación por el tráfico de la maquinaria agrícola: su efecto sobre el esfuerzo cortante del suelo y el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.). *Siembra*, 3(1), 21–36. <https://doi.org/10.29166/siembra.v3i1.256>

- Mur, M., y Balbuena, R. (2014). Compactación de un suelo argiudol típico por tráfico en un sistema de producción de forrajes. *Ciencia del Suelo*, 32, 1-12. http://www.suelos.org.ar/publicaciones/vol_32n1/1-12%20pags%201CS%20269%20Mur%20Matilde%20et%20al%202014.pdf
- Qin, T., Wang, L., Zhou, Y., Guo, L., Jiang, G., & Zhang, L. (2022). Digital Technology-and-Services-Driven Sustainable Transformation of Agriculture: Cases of China and the EU. *Agriculture*, 12(2), 297. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020297>
- Robinson, D. A., Thomas, A., Reinsch, S., Lebron, I., Feeney, C. J., Maskell, L. C., ... & Cosby, B. J. (2022). Analytical modelling of soil porosity and bulk density across the soil organic matter and land-use continuum. *Scientific reports*, 12(1), 7085. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11099-7>
- Rodríguez, L., y Valencia, J. (2012). Impacto del tráfico de equipos durante la cosecha de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12(10), 1128-1136. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001000014>
- Shaheb, M.R., Venkatesh, R. & Shearer, S.A. (2021). A Review on the Effect of Soil Compaction and its Management for Sustainable Crop Production. *J. Biosyst. Eng.* 46, 417–439. <https://doi.org/10.1007/s42853-021-00117-7>
- Shaikh, T. A., Rasool, T., & Lone, F. R. (2022). Towards leveraging the role of machine learning and artificial intelligence in precision agriculture and smart farming. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, 107119. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107119>
- Silva, R. P., Rolim, M. M., Gomes, I. F., Pedrosa, E. M., Tavares, U. E., & Santos, A. N. (2018). Numerical modeling of soil compaction in a sugarcane crop using the finite element method. *Soil and Tillage Research*, 181, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.03.019>
- Torres, J., Gutierrez, J. A., & Beltran, H. A. (2017). Compactación, Una de las causas más comunes de la degradación del suelo. *Ciencias Agropecuarias*, 3(3), 18-22. <https://doi.org/10.36436/24223484.225>
- Úbeda Rivera, J. S., & Delgado Dallatorre, Y. (2018). La infiltración del agua en los suelos y componentes artificiales y materia orgánica que se utilizan en ellos para la agricultura. *Rev. Iberoam. Bioecon. Cambio Clim.*, 4(7), 889–896. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v4i7.6299>
- Vaca García, V. M., Martínez Villanueva, J. J., González Huerta, A., Morales Rosales, E. J., Zamudio González, B., & Gutiérrez Rodríguez, F. (2014). Compactación de un vertisol bajo tres sistemas de labranza en maíz (*Zea mays* L.). *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 5(8), 1495-1507. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-09342014000800013&script=sci_arttext
- Wang, Y., Qiao, J., Ji, W., Sun, J., Huo, D., Liu, Y., & Chen, H. (2022). Effects of crop residue managements and tillage practices on variations of soil penetration resistance in sloping farmland of Mollisols. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 15(1), 164-171. <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20221501.6526>

Capítulo III

III. MAPEO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL EN AGRICULTURA DIGITAL: UNA HERRAMIENTA EN PYTHON

Resumen

Este estudio se enfocó en el desarrollo de un sistema de información geográfica portátil mediante la utilización de módulos especializados en el ecosistema y comparar los resultados de este sistema, denominado GeoStatLiteUN v2021.6.1, con el motor geoestadístico SAGA GIS. Para lograr este propósito, se desarrolló la aplicación, la cual incorporó módulos especializados, como SciPy v1.20.3, NumPy v1.20.0, statsmodels v0.12.2, PyKrige v1.6.0, Matplotlib.pyplot v3.4.2, seaborn v0.11.1 y Tkinter en el entorno de Python (versión 3.9.5). Mediante un enfoque de geoestadística, se automatizaron procedimientos repetitivos para analizar la variabilidad espacial dentro y fuera de lotes, empleando la interpolación Kriging ordinario. Este sistema proporciona a los usuarios la capacidad de procesar y analizar datos espaciales, así como construir mapas de variabilidad espacial. La evaluación de GeoStatLiteUN demostró la validez de sus resultados, respaldada por la similitud de estos con los obtenidos mediante SAGA GIS. GeoStatLiteUN v2021.6.1 aporta innovación al incorporar protocolos automáticos para la depuración, basados en la prueba de Tukey para detectar atípicos leves, y validación de la estacionariedad de sentido amplio. Además, se presenta como un archivo portable, lo que facilita su uso tanto del sistema como del método de geoestadística Kriging ordinario para profesionales del agro en el campo, sin necesidad de conocimientos previos en algoritmos matemáticos. Este sistema representa un avance en el acceso a herramientas geoespaciales.

Palabras clave: agrícola, geoestadística, interpolación, Kriging, SIG.

3.1. Introducción

La cuarta revolución industrial está siendo involucrada en el ámbito de la producción agrícola con el desarrollo del Big Data, el Internet de las Cosas, la robótica y la Inteligencia Artificial, el término agricultura digital surge cuando se utiliza el conocimiento científico, las tecnologías de la información y de la comunicación para obtener un desarrollo sostenible y competitivo en los sistemas de producción agrarios, en este sentido la agricultura digital es una modernización del concepto de agricultura de precisión, siendo esta última una estrategia de gestión que recopila, procesa y analiza datos temporales y espaciales de los agroecosistemas para mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción agraria².

En la etapa de recolección, los elementos físicos más modernos involucrados en los sistemas de producción (tractores, sembradoras, cosechadora, abonadoras, etc.) generan grandes cantidades de datos que se transfieren a través de redes inalámbricas y se almacenan en bases de datos. Si el procesamiento y análisis de estas bases de datos involucra un hardware potente y softwares que permita usar la programación para manipular rápidamente la información de tal

² Adaptación de la definición de agricultura de precisión publicada por ISPA (International Society of Precision Agriculture) en: <https://www.ispag.org/about/definition>

forma que sea apta para aplicar técnicas estadísticas o geoestadísticas que respalden las decisiones de gestión de los sistemas de producción agrícola; es entonces, cuando se puede hablar de agricultura digital (Kamilaris *et al.*, 2017; Bassoi *et al.*, 2019).

Un programa ampliamente usado (por ser de libre acceso) para procesar y analizar los datos es Quantum GIS (QGIS), el cual es un sistema de información geográfica profesional que está construido sobre software libre y de código abierto, el cual usa un sistema automatizado para el análisis geoestadístico, agrupados en módulos llamado SAGA GIS. Aunque, se pueden encontrar otros programas con una amplia gama de aplicaciones para la agricultura como ArcGIS (software privativo) o GRASS GIS (código abierto).

La técnica usada comúnmente para la interpolación espacial de variables geofísicas se conoce como Kriging ordinario y se puede definir como el mejor interpolador lineal óptimo insesgado desde la estadística convencional, que permite hacer inferencias al calcular el error de estimación de las variables (modelo probabilístico) cuando el fenómeno que se estudia es estacionario y de media desconocida.

Gutiérrez-Lopez *et al.* (2012) explican de forma detallada el método Kriging y concluyen que cuando la precisión de los resultados es lo importante (conocer el error de estimación) el Kriging es el método privilegiado que debe utilizarse.

El método Kriging ordinario ha sido y es usado en los estudios sobre la variabilidad espacial de propiedades físicas de los suelos agrícolas o parámetros de las operaciones de mecanización agrícola que se realizan sobre los suelos gestionados. Por ejemplo, Yescas-Coronado *et al.* (2018), Loayza *et al.* (2020) y Salgado-Velázquez *et al.* (2020) aplican la técnica para estimar la variabilidad espacial del carbono orgánico e inorgánico del suelo en la Comarca Lagunera, México, del carbono orgánico en suelos de Ecuador y de propiedades fisicoquímicas en un suelo cultivado con caña de azúcar en el Sureste de México, respectivamente.

La generación de grandes cantidades de datos (espaciales y temporales) sobre los parámetros que influyen en los sistemas productivos agrícolas (suelo, agua, insumos, maquinas, etc.) ha traído consigo el reto de generar herramientas informáticas que permitan procesar y analizar de forma rápida dichos datos para generar estrategias de gestión que permitan obtener el mayor número de decisiones correctas por unidad de área, una forma de crear estas herramientas es a través del uso de lenguajes de programación, que permitan automatizar tareas repetitivas propias de la gestión de los datos con el fin de ayudar a la adecuada toma de decisiones (Cravero y Sepúlveda, 2021).

Con el uso de lenguajes de programación (como Python) se pueden generar scripts que con solo un comando posibilite depurar bases de datos con el fin de someterlas a técnicas de la geoestadística, como el Kriging ordinario; sin duda una opción que facilitaría el trabajo de los agricultores y los profesionales del agro (Kim *et al.*, 2016).

Lago-González *et al.* (2011) desarrollaron una aplicación de las primeras en su tipo para la creación de mapas de rendimiento en las consolas TechAgro integradas a cosechadoras, de forma alcanzable para cualquier usuario sin tener conocimientos previos de los algoritmos matemáticos a usar.

Posteriormente se conoció que Herrera-Gómez y Reinoso-Gutierrez (2016) desarrollaron una aplicación web en Java para el monitoreo y supervisión de variables espacio temporales (sin ningún tipo de procesamiento geoestadístico) medidas por sensores en campo que permitió a los agricultores conocer con certeza la condiciones en la que se encuentran sus cultivos en tiempo real, las 24 horas del día.

Así mismo, Paccioretti *et al.* (2020) mostraron una experiencia exitosa en el desarrollo de una aplicación web para mapeo de variabilidad espacial en agricultura y ambiente con una interfaz

amigable utilizando el lenguaje de programación R, el cual “mejoró la zonificación lograda respecto a métodos convencionales de clasificación, delimitando zonas con mayores diferencias en variables de suelo y topografía”.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar una aplicación portátil con una interfaz gráfica de usuario (IGU) en Python para automatizar el análisis de variabilidad espacial y la creación de mapas mediante interpolación Kriging ordinario. Se pretende facilitar su uso en el campo para profesionales agrícolas sin conocimientos previos de algoritmos matemáticos y validar el sistema comparando los resultados con SAGA GIS de QGIS.

3.2. Materiales y métodos

3.2.1. Desarrollo de la aplicación

Se desarrolló la aplicación GeoStatLiteUN con IGU implementando módulos especializados del lenguaje Python (Python 3.9.5) en un script que sigue la lógica que se usa para el análisis de bases de datos espaciales con el método de interpolación Kriging ordinario (estudio descriptivo, depuración, supuesto de estacionariedad, análisis estructural y creación de superficie continua), los cuales posibilitaron leer las bases de datos estandarizadas (archivos estructurado separados por coma en extensión .csv con tres columnas de interés que deben ser nombradas con identificadores DV, X y Y, siendo la variable a estudiar y sus covariables espaciales respectivamente), aplicar pruebas de la estadística descriptiva, mostrar histogramas y gráficos cuantil a cuantil (Q-Q) de probabilidad normal, aplicar protocolos para: depuración según la prueba de Tukey para atípicos leves, generar una regresión lineal de la variable de interés con covariables espaciales, la creación de un modelo de semivariograma y un mapa de superficie continua con interpolación Kriging ordinario (Córdoba *et al.*, 2012; Jaramillo-Jaramillo, 2012; Fernández y i Dasi, 2014).

La lectura de la base de datos estandarizada se programó con el módulo pandas v1.2.4; las pruebas de la estadística descriptiva, la depuración y la regresión lineal multivariada se programó con el módulo SciPy v1.20.3, NumPy v1.20.0 y statsmodels v0.12.2; los protocolos para el semivariograma y la interpolación Kriging ordinaria se programaron con el módulo PyKrige v1.6.0; los histogramas y los gráficos Q-Q se programaron con los módulos Matplotlib.pyplot v3.4.2 y seaborn v0.11.1 y la IGU se desarrolló con el paquete Tkinter de Python.

3.2.2. Bases de datos de prueba

Se utilizaron para procesar en GeoStatLiteUN y SAGA GIS dos bases de datos correspondientes a suelos gestionados para la producción de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). Las bases de datos respondieron a los resultados de una operación de fertilización mecánica a tasa variada en un lote de 6 hectáreas (con 3630 datos asociados) y una operación de roturación vertical con cincel de cuatro brazos (dos brazos anteriores de 40 cm de profundidad y dos posteriores de 60 cm de profundidad) en un lote de 27 hectáreas (con 12318 datos asociados). Las variables de interés fueron: dosis de nitrógeno entregado por hectárea ($\text{kg}_{\text{nitrógeno}}/\text{ha}$) y profundidad alcanzada (cm); a cada una se les asignó atributos espaciales en coordenadas proyectadas del Datum UTM zona 18N, que fueron capturadas durante las operaciones a través de un sistema global de navegación por satélite con corrección de doble frecuencia.

3.2.3. Análisis estadístico

3.2.3.1. Procesamiento de datos

En el programa GeoStatLiteUN se hizo un análisis exploratorio de las dos bases de datos que indicó la necesidad o no de depurar, las cuales se sometieron a pruebas de la estadística descriptiva en los que se determinó: la media, desviación estándar, valor máximo y mínimo, coeficiente de variación, simetría, estudio de la normalidad y la estacionariedad, pruebas esenciales para determinar la idoneidad de la información, previo a la aplicación del método de interpolación Kriging ordinario.

La estadística descriptiva y prueba normalidad en el sistema GeoStatLiteUN se hicieron con los métodos: describe(), skew() y shapiro() (con significancia del 5%) de la librería SciPy; la regresión lineal multivariada para la prueba de estacionariedad de sentido amplio se programó utilizando el método from_formula() de la librería statsmodels, y el método de interpolación Kriging ordinario se implementó con el método OrdinaryKriging() de la librería PyKrige.

La depuración de las bases de datos (cuando su distribución no fue simétrica) consistió en la eliminación de valores atípicos considerados leves según la prueba de Tukey; para esto GeoStatLiteUN identificó el cuantil uno (Q1) y el cuantil tres (Q3), el rango intercuantil (IQR) y eliminó todos los datos que estuvieron a una y media (1.5) veces el IQR por debajo del Q1 y por encima del Q3, estableciendo así nuevos mínimos y máximos para el atributo de interés de las bases de datos analizadas; este proceso se programó utilizando los métodos quantile(), min() y max() de Python.

3.2.3.2. Generación de superficies continuas

GeoStatLiteUN es un programa que genera superficies continuas univariadas (una sola variable dependiente con covariables espaciales) mediante el método Kriging ordinario bajo el supuesto de isotropía, el cual depende de un modelo de semivariograma ajustado. El programa es capaz de ajustar cuatro modelos de semivariogramas teóricos: Linear, Exponential, Spherical y Gaussian; el cual se usa para estimar las predicciones como una ponderación que asigna mayor peso a los valores que están cerca entre sí y menor peso a las que están más distantes entre sí. Es decir, Los parámetros del semivariograma determinan los pesos de los datos que serán usados para la estimación de las predicciones.

Para la selección del modelo de mejor ajuste a la variabilidad espacial de los datos analizados, GeoStatLiteUN proporciona información sobre tres geoestadísticos conocidos como: Q_1 , Q_2 y cR ; donde Q_1 representa el error medio del modelo, Q_2 representa la varianza del error y cR representa la media geométrica de los residuos al cuadrado (que tiene que ver con la variabilidad espacial que no es capaz de explicar el modelo). Un buen modelo de Kriging ordinario debe arrojar un Q_1 cercano a cero, un Q_2 cercano a uno y el menor valor posible de cR (Stephan *et al.*, 2016).

3.2.3.3. Evaluación de GeoStatLiteUN

El objetivo del software SAGA GIS (Sistema para Análisis Geocientíficos Automatizados o System for Automated Geoscientific Analyses por sus siglas en inglés) es brindar una plataforma eficaz y fácil de aprender para la implementación de métodos geocientíficos y hacer que estos métodos sean accesibles mediante su interfaz gráfica de usuario. En este estudio se compararon los resultados de GeoStatLiteUN y SAGA GIS a través de los modelos de superficies continuas creados con los datos de prueba (que fueron analizados en GeoStatLiteUN ya que SAGA GIS no ofrece esa facilidad) en ambos programas a partir de los semivariogramas construidos con un número de iteraciones igual a treinta (intervalos de clase).

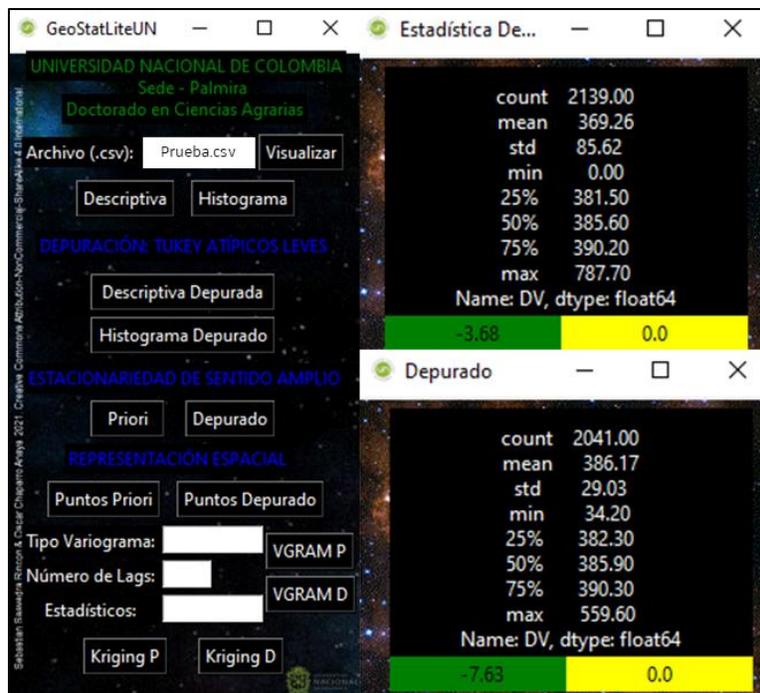
La comparación se hizo a través de las visualizaciones de los resultados producidos, las características de los semivariogramas; Nugget, Rango y Full Sill y los estadísticos de los modelos espaciales; mínimo, máximo, media y desviación estándar. Adicionalmente como un parámetro de evaluación se construyeron intervalos de confianza con una confiabilidad del 99% y significancia del 1% para las medias de los modelos construidos con GeoStatLiteUN y SAGA GIS (Diez *et al.*, 2019); y se consideró razonable decir que los modelos construidos con GeoStatLiteUN son aceptables si su intervalo contuvo la media de la muestra.

3.3. Resultados

3.3.1. Aplicación

Se desarrolló el programa GeoStatLiteUN v2021.6.1 con IGU (figura 3.1), una aplicación que implementa métodos estadísticos y geoestadísticos utilizando módulos especializados de Python, que permite al usuario de forma rápida procesar y analizar bases de datos con un atributo y sus covariables espaciales y obtener resultados de forma automática. GeoStatLiteUN se encuentra disponible para su descarga libre en https://drive.google.com/file/d/1wIhKBHm4CdL0cXzDtbtVfaXRkPGwb6_H/view?usp=sharing.

Figura 3.1. GeoStatLiteUN v2021.6.1 IGU - Ejemplo.



3.3.2. Análisis estadístico

3.3.2.1. Procesamiento de datos - Operación de fertilización mecánica a tasa variada

Los estadísticos de la base de datos depurada de forma automática en GeoStatLiteUN correspondiente a la operación de fertilización mecánica a tasa variada se muestran en la tabla 3.1. Para el procesamiento y análisis, la base de datos contó con un total de 1183 datos del atributo de interés con sus respectivas covariables espaciales, un valor mínimo de 124.80 kg_{nitrogeno}/ha, un valor

máximo de 282.90 kg_{nitrógeno}/ha, una media de 214.21 kg_{nitrógeno}/ha y una desviación estándar de 20.12 kg_{nitrógeno}/ha.

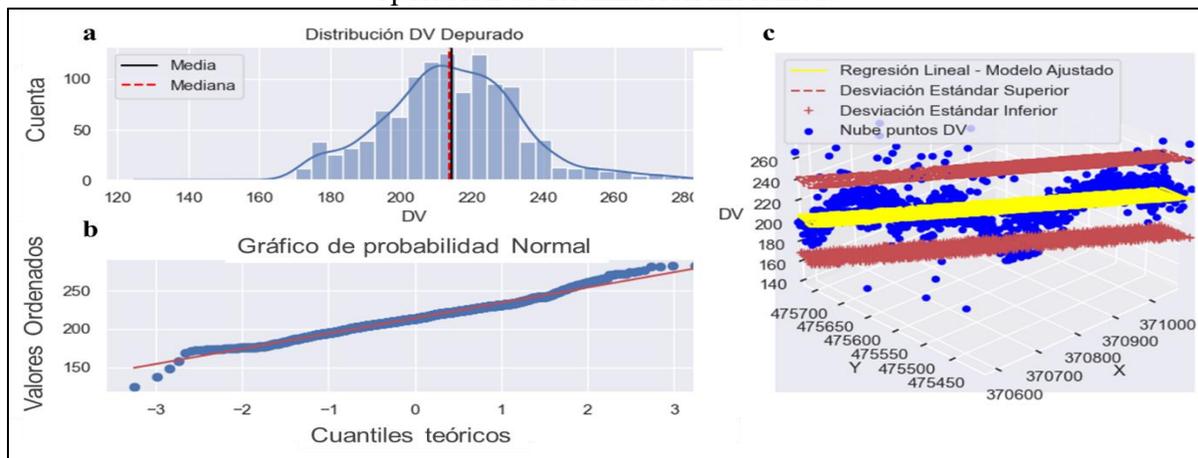
Tabla 3.1. Estadística descriptiva – variable dosis en la operación de fertilización mecánica.

Dosis (kg _{nitrógeno} /ha)			
Cuenta	1183	Cuantil 1	202.35
Media	214.21	Cuantil 2	213.6
desviación estándar	20.12	Cuantil 3	226.3
Mínimo	124.8	Máximo	282.9

El histograma y la gráfica Q-Q para la variable (figura 3.2a y figura 3.2b) mostró que la distribución no sigue estrictamente la forma de una distribución normal, pero, debido al número de datos que se analizó, fue posible aplicar el teorema del límite central y decir que la media de la distribución de la muestra tiende a ser normal y simétrica (Diez *et al.*, 2019).

Por otro lado, el modelo de regresión lineal multivariado (figura 3.2c), mostró que los datos del atributo de interés no siguieron una tendencia lineal frente a sus covariables espaciales y se agruparon alrededor de la media del modelo de regresión lineal de forma uniforme con distancia casi igual a una desviación estándar de la muestra. Lo que indicó que el fenómeno fue un proceso estocástico estacionario de sentido amplio (Jaramillo-Jaramillo, 2012). Como consecuencia de lo anterior, la base de datos depurada correspondiente a la operación de fertilización mecánica a tasa variada fue apta para la creación de un semivariograma y un modelo de superficie continua con el método Kriging ordinario.

Figura 3.2. Histograma (a), Q-Q plot (b) y regresión lineal multivariada (c) - variable dosis en la operación de fertilización mecánica.



3.3.2.2. Procesamiento de datos - Operación de roturación vertical con cinceles rígidos

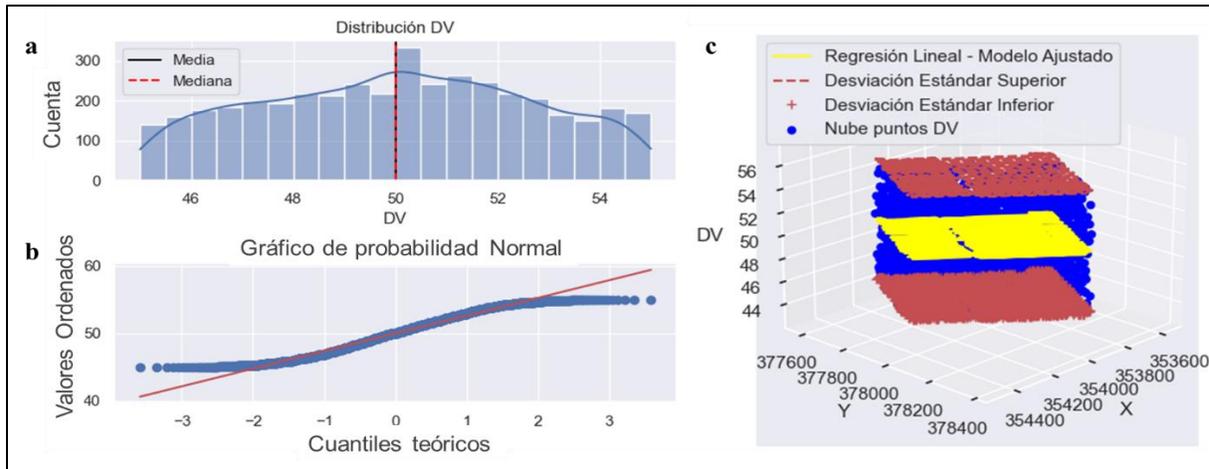
Los datos registrados durante la operación de roturación vertical con cinceles rígidos no requirieron ser sometidos al protocolo automático de depuración ofrecido por la herramienta GeoStatLiteUN, debido a que, los valores de la media y el cuantil dos son iguales con un valor de 50 cm (distribución simétrica). Para el análisis exploratorio, se trabajó con 4105 datos del atributo de interés con sus respectivas covariables espaciales para un valor mínimo de 45 cm, un valor máximo de 55 cm, una media de 50 cm y una desviación estándar de 2.65 cm (tabla 3.2).

Tabla 3.2. Estadística descriptiva – variable profundidad en la operación de roturación vertical.

Profundidad (cm)			
Cuenta	4105	Cuantil 1	47.9
Media	50.02	Cuantil 2	50
desviación estándar	2.65	Cuantil 3	52.1
Mínimo	45	Máximo	55

El histograma y la gráfica Q-Q para la variable (figura 3.3a y figura 3.3b) mostró que la distribución no sigue estrictamente la forma de una distribución normal, pero, debido al número de datos que se analizó, fue posible aplicar el teorema del límite central y decir que la media de la distribución de la muestra tiende a ser normal y simétrica (Diez *et al.*, 2019).

Figura 3.3. Histograma (a), Q-Q plot (b) y regresión lineal multivariada (c) - variable profundidad en la operación de roturación vertical.



Por otro lado, el modelo de regresión lineal multivariado (figura 3.3c), mostró que los datos del atributo de interés no siguieron una tendencia lineal frente a sus covariables espaciales y se agruparon alrededor de la media del modelo de regresión lineal de forma uniforme con distancia igual a una desviación estándar de la muestra, lo que indicó que el fenómeno fue un proceso estocástico estacionario de sentido amplio (Jaramillo-Jaramillo, 2012). Como consecuencia de lo anterior, la base de datos depurada correspondiente a la operación de roturación vertical con cinceles rígidos fue apta para la creación de un semivariograma y un modelo de superficie continua con el método Kriging ordinario.

3.3.2.3. Generación de superficie continua – Fertilización mecánica a tasa variada

En GeoStatLiteUN se crearon cuatro semivariogramas empíricos y teóricos del atributo de interés y sus covariables espaciales. El modelo que mejor se ajustó a la base de datos depurada fue el Esférico, con el menor valor de cR igual a 202.93, los geoestadísticos para este modelo fueron: 0.11 y 0.56 respectivamente para Q_1 y Q_2 (tabla 3.3).

Tabla 3.3. Geoestadísticos – variable dosis en la operación de fertilización mecánica.

Geoestadísticos	Modelo Semivariograma			
	Lineal	Exponencial	Esférico	Gaussiano
Q ₁	0.13	0.09	0.11	0.21
Q ₂	0.58	3.18	0.56	0.76
cR	212.41	188.28	202.93	281.6

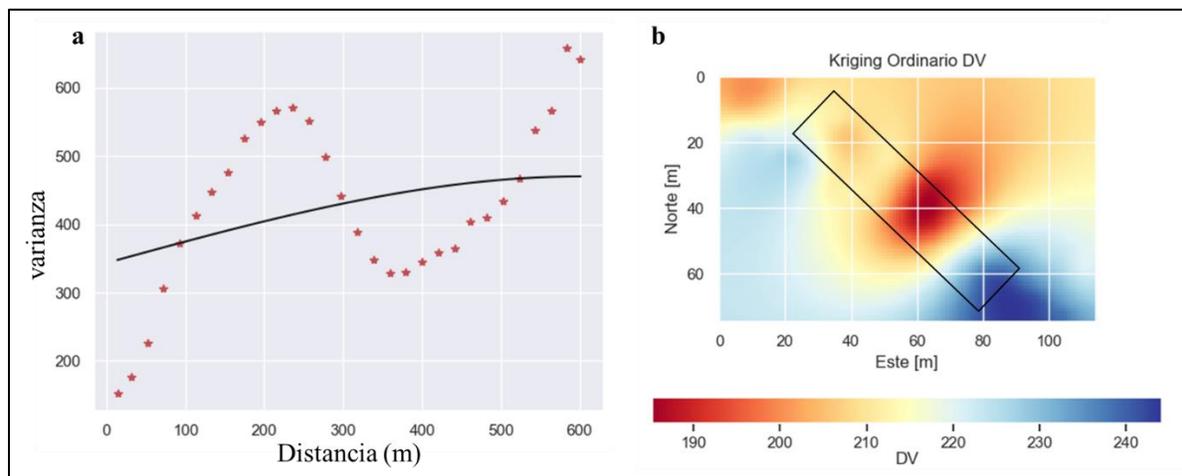
Las características estructurales del semivariograma de mejor ajuste a la base de datos depurada (figura 3.4a) se pueden ver en la tabla 3.4, al igual que los parámetros estadísticos del modelo de superficie continua que representó espacialmente el fenómeno estudiado. Es importante resaltar que el modelo de superficie continua disminuyó la variabilidad del atributo de interés, mostrando un valor mínimo mayor y un valor máximo menor al que se encontró en la estadística descriptiva de la tabla 3.1.

Tabla 3.4. Características estructurales del semivariograma ajustados y estadístico del modelo de superficie continua Kriging ordinario – variable dosis en la operación de fertilización mecánica.

Semivariograma ajustado (características)	
Nugget (kg _{nitrógeno} /ha) ²	343.50
Rango (m)	601.10
Full Sill (kg _{nitrógeno} /ha) ²	470.40
Modelo Kriging ordinario (kg _{nitrógeno} /ha)	
Mínimo	185.21
Máximo	244.16
Media	214.77
Desviación estándar	10.93

Con la información estructural de la base de datos, se construyó el modelo Kriging ordinario de superficie continua que modeló espacialmente el comportamiento de la operación de fertilización mecánica en términos de dosis de nitrógeno aplicada (figura 4b).

Figura 3.4. Semivariograma (a) y superficie continua Kriging (b) - variable dosis en la operación de fertilización mecánica.



3.3.2.4. Generación de superficie continua – Roturación vertical con cinceles rígidos

En GeoStatLiteUN se crearon cuatro semivariogramas empíricos y teóricos del atributo de interés y sus covariables espaciales. El modelo que mejor se ajustó a la base de datos fue el Exponencial, con el menor valor de cR igual a 6.49 y los geoestadísticos para este modelo fueron: 0.02 y 1.03 respectivamente para Q_1 y Q_2 (tabla 3.5).

Tabla 3.5. Geoestadísticos – variable profundidad en la operación de roturación vertical.

Geoestadísticos	Modelo Semivariograma			
	Lineal	Exponencial	Esférico	Gaussiano
Q_1	0.02	0.02	0.02	0.02
Q_2	1.02	1.03	1.03	1.03
cR	7.07	6.49	6.58	6.6

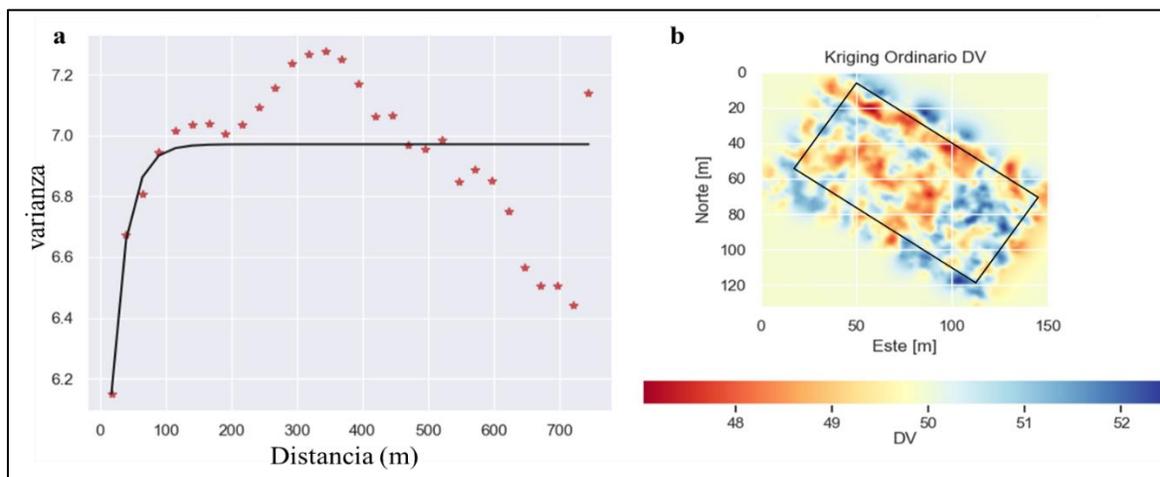
Las características estructurales del semivariograma que mejor se ajustó a la base de datos depurada (figura 3.5a) se presentan en la tabla 3.6, al igual que los parámetros estadísticos del modelo de superficie continua que representó espacialmente el fenómeno estudiado. Es importante resaltar que el modelo de superficie continua disminuyó la variabilidad del atributo de interés, mostrando un valor mínimo mayor y un valor máximo menor al que se encontró en la estadística descriptiva de la tabla 3.2.

Tabla 3.6. Características estructurales del semivariograma ajustados y estadístico del modelo de superficie continua Kriging ordinario – profundidad en la operación de roturación vertical.

Semivariograma ajustado (características)	
Nugget (cm ²)	5.27
Rango (m)	69.97
Full Sill (cm ²)	6.97
Modelo Kriging ordinario (cm)	
mínimo	47.03
máximo	52.48
media	49.93
desviación estándar	0.68

Con la información estructural de la base de datos se construyó el modelo Kriging ordinario de superficie continua que modeló espacialmente el comportamiento de la operación de fertilización mecánica en términos de profundidad alcanzada en el suelo (figura 5b).

Figura 3.5. Semivariograma (a) y superficie continua Kriging (b) - variable profundidad en la operación de roturación vertical.



3.3.2.5. Generación de superficies continuas en SAGA GIS – Operaciones: fertilización mecánica a tasa variada y roturación vertical con cinceles rígidos

3.3.2.5.1. Fertilización mecánica a tasa variada

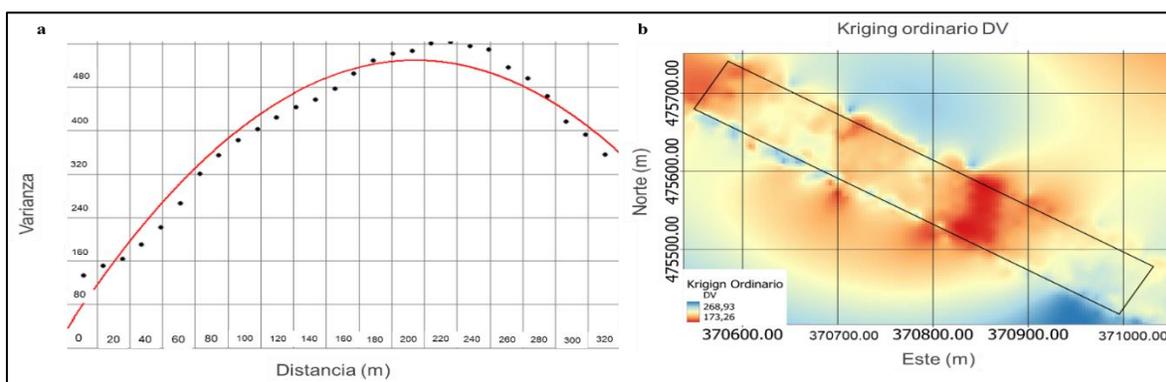
Las características estructurales del semivariograma que mejor se ajustó a la base de datos depurada (figura 3.6a) se pueden ver en la tabla 3.7, al igual que los parámetros estadísticos del modelo de superficie continua que representó espacialmente el fenómeno estudiado. Es importante resaltar que el modelo de superficie continua creado con SAGA GIS al igual que en GeoStatLiteUN disminuye la variabilidad del atributo de interés, mostrando un valor mínimo mayor y un valor máximo menor al que se determinó en la estadística descriptiva de la tabla 3.1, sin embargo, la desviación estándar del modelo SAGA GIS de 18.35 $\text{kg}_{\text{nitrógeno}}/\text{ha}$ fue más cercano a la desviación de 20.12 $\text{kg}_{\text{nitrógeno}}/\text{ha}$ que presentó en la tabla 3.1.

Tabla 3.7. Características estructurales del semivariograma Esférico ajustado por defecto en SAGA GIS y estadísticos del modelo de superficie continua Kriging ordinario – variable dosis en la operación de fertilización mecánica.

Semivariograma ajustado (características)	
Nugget ($\text{kg}_{\text{nitrógeno}}/\text{ha})^2$	28.86
Rango (m)	338.50
Full Sill ($\text{kg}_{\text{nitrógeno}}/\text{ha})^2$	360.00
Modelo Kriging ordinario ($\text{kg}_{\text{nitrógeno}}/\text{ha}$)	
Mínimo	173.26
Máximo	268.93
Media	217.91
Desviación estándar	18.35

Con la información estructural de la base de datos se construyó el modelo Kriging ordinario de superficie continua en SAGA GIS que modeló espacialmente el comportamiento de la operación de fertilización mecánica en términos de dosis de nitrógeno aplicada (figura 3.6b).

Figura 3.6. Semivariograma (a) y superficie continua Kriging (b) SAGA GIS - variable dosis en la operación de fertilización mecánica.



3.3.2.5.2. Roturación vertical con cinceles rígidos

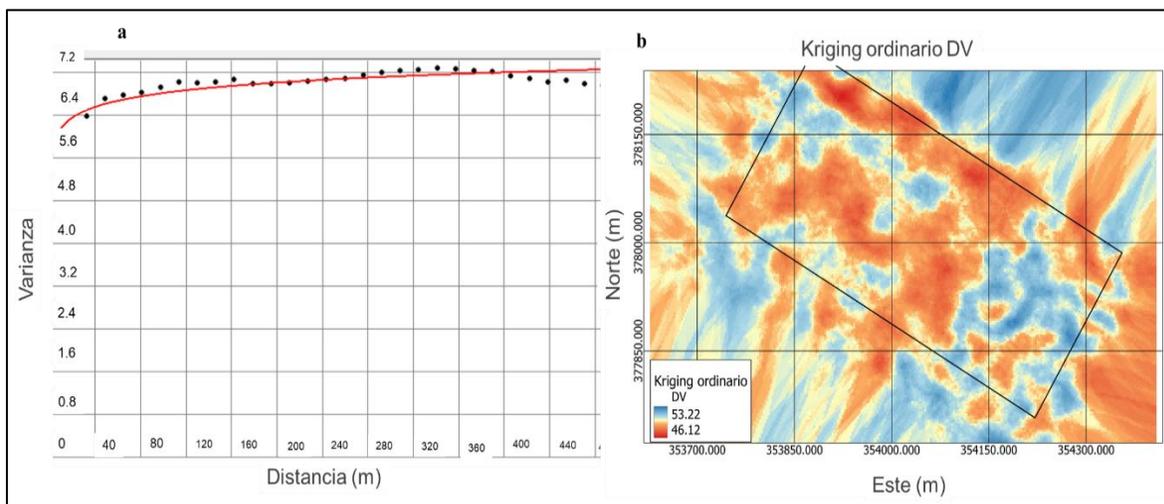
Las características estructurales del semivariograma que mejor se ajustó a la base de datos depurada (figura 3.7a) se pueden ver en la tabla 3.8, al igual que los parámetros estadísticos del modelo de superficie continua que representó espacialmente el fenómeno estudiado. Es importante resaltar que el modelo de superficie continua creado con SAGA GIS al igual que en GeoStatLiteUN disminuyó la variabilidad del atributo de interés, mostrando un valor mínimo mayor y un valor máximo menor al que se determinó en la estadística descriptiva de la tabla 3.2. Sin embargo, la desviación estándar del modelo SAGA GIS de 1.02 cm fue más cercano a la desviación de 2.65 cm presentado en la tabla 3.2.

Tabla 3.8. Características estructurales del semivariograma Exponencial ajustado por defecto en SAGA GIS y estadísticos del modelo de superficie continua Kriging ordinario – profundidad en la operación de roturación vertical.

Semivariograma ajustado (características)	
Nugget (cm²)	5.60
Rango (m)	488.26
Full Sill (cm²)	7.10
Modelo Kriging ordinario (cm)	
Mínimo	46.12
Máximo	53.22
Media	49.96
Desviación estándar	1.02

Con la información estructural de la base de datos se construyó el modelo Kriging ordinario de superficie continua en SAGA GIS que modeló espacialmente el comportamiento de la operación de roturación vertical en términos de profundidad alcanzada (figura 3.7b).

Figura 3.7. Semivariograma (a) y superficie continua Kriging (b) SAGA GIS - variable profundidad en la operación de roturación vertical.



3.3.2.6. Evaluación de GeoStatLiteUN

3.3.2.6.1. Modelos Espaciales – Operación de fertilización mecánica a tasa variada

En términos estructurales los valores más bajos para las características del semivariograma se obtuvieron en el programa SAGA GIS (tabla 3.9). Esto se explica porque los modelos utilizados en ambos programas son similares más no iguales, lo que resulta en un comportamiento diferente de las características de los modelos ajustados.

El modelo GeoStatLiteUN fue conservador (menos variable en relación con la media de la muestra) frente al modelo SAGA GIS (más variable en relación con la media de la muestra), lo anterior se puede afirmar con base en el valor del Rango (su magnitud expresa la variabilidad espacial del atributo, en cuanto más grande sea, la variabilidad espacial es menor) para GeoStatLiteUN que frente al valor de SAGA GIS fue mayor (Villatoro *et al.*, 2007; Acevedo *et al.*, 2008; Saavedra-Rincon, 2018).

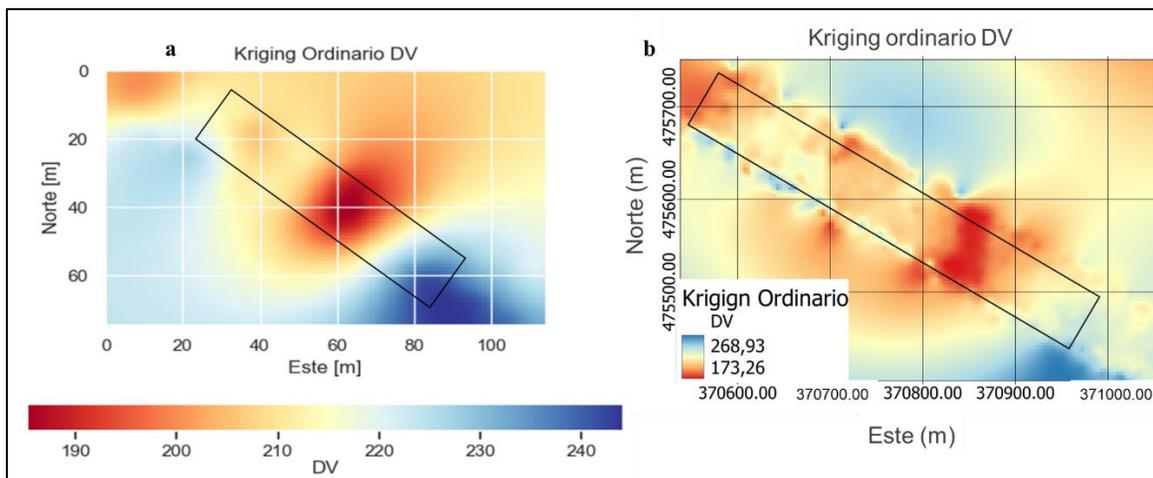
Lo anterior influyó en los valores mínimos y máximos para los modelos de superficie continua, donde, para SAGA GIS fueron más cercanos a sus pares mostrados en la tabla 3.1, que los valores para GeoStatLiteUN, lo que se reflejó en una desviación estándar para SAGA GIS (18.35 kg_{nitrógeno}/ha) similar a la desviación estándar exploratoria de la tabla 3.1 (20.12 kg_{nitrógeno}/ha) en comparación con la desviación estándar para GeoStatLiteUN (10.93 kg_{nitrógeno}/ha).

Tabla 3.9. Características estructurales de los semivariogramas Esféricos y estadísticos de los modelos de superficie continua Kriging ordinario - GeoStatLiteUN y SAGA GIS

Semivariograma ajustado	GeoStatLiteUN	SAGA GIS
Nugget (kg_{nitrógeno}/ha)²	343.5	28.86
Rango (m)	601.1	338.5
Full Sill (kg_{nitrógeno}/ha)²	470.4	360
Modelo Kriging ordinario (kg_{nitrógeno}/ha)	GeoStatLiteUN	SAGA GIS
mínimo	185.21	173.26
máximo	244.16	268.93
media	214.77	217.91
desviación estándar	10.93	18.35

La comparación visual de los modelos GeoStatLiteUN (figura 3.8a) y SAGA GIS (figura 3.8b) evidenció concordancia en su distribución, es decir que, aunque el rango de valores que el atributo tomó con relación a las covariables espaciales en ambos modelos fue diferente (diferentes mínimos, medias y máximos), el comportamiento espacial del fenómeno analizado fue similar (superficies continuas con modelos de colores distribuidos de forma similar).

Figura 3.8. Modelos Kriging Ordinario: GeoStatLiteUN (a) y SAGA GIS (b) - variable dosis en la operación de fertilización mecánica.



Se puede afirmar, según los intervalos de confianza para los modelos GeoStatLiteUN y SAGA GIS (tabla 3.10), que la media de la muestra estará en el 99% de los intervalos de confianza construidos con los estadísticos de los modelos desarrollados con base en la muestra (Diez *et al.*, 2019); y que, fue razonable decir que el modelo construido con GeoStatLiteUN fue aceptable (el intervalo de confianza contiene la media de la muestra) aunque es un modelo conservador (menos dependiente de los valores extremos) frente al construido con SAGA GIS.

Tabla 3.10. Intervalos de confianza para los modelos GeoStatLiteUN y SAGA GIS.

Límites - Intervalos de Confianza		
	GeoStatLiteUN	SAGA GIS
Límite Inferior (kg_{nitrógeno}/ha)	213.95	216.86
Límite Superior (kg_{nitrógeno}/ha)	215.59	219.28

3.3.2.6.2. Modelos Espaciales – Operación de roturación con cinceles rígidos

En términos estructurales los valores más bajos para las características del semivariograma se obtuvieron en el programa GeoStatLiteUN (tabla 3.11). Esto se explica porque los modelos utilizados en ambos programas son similares más no iguales, lo que resulta en un comportamiento diferente de las características de los modelos ajustados.

El modelo GeoStatLiteUN fue más variable frente al modelo SAGA GIS debido a que el valor del Rango para GeoStatLiteUN fue menor frente al valor de SAGA GIS (Villatoro *et al.*, 2007; Saavedra-Rincon, 2018).

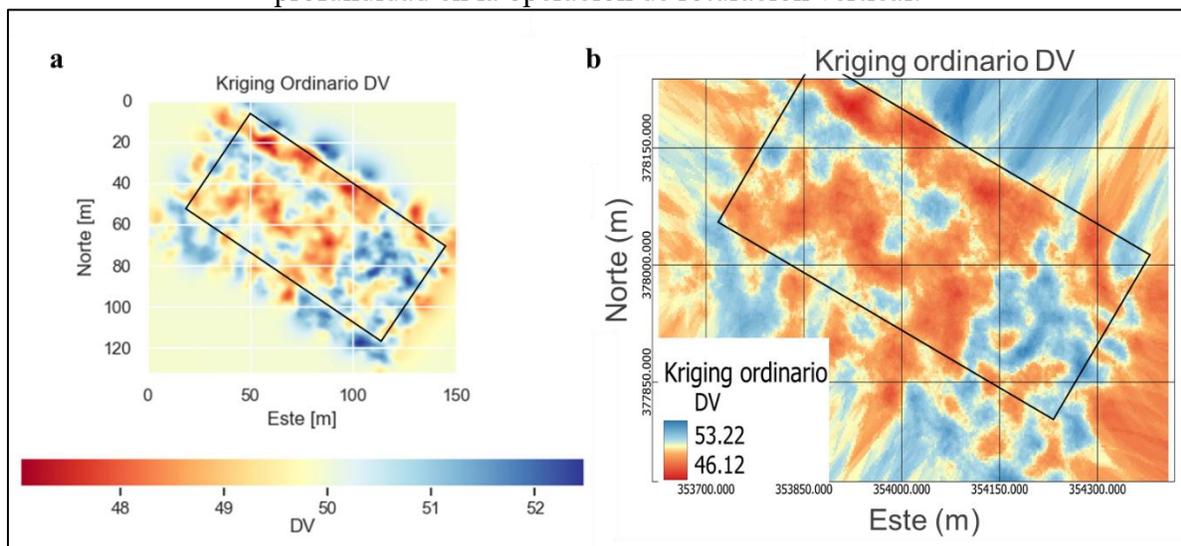
Sin embargo, lo anterior no influyó en los valores mínimos y máximos para los modelos de superficie continua en donde, para SAGA GIS (46.12 cm y 53.22 cm respectivamente) y GeoStatLiteUN (47.03 cm y 52.48 cm respectivamente) sus valores fueron similares y cercanos a sus pares mostrados en el tabla 3.2 (45 cm y 55 cm respectivamente), lo que se reflejó en una desviación estándar para SAGA GIS (1.02 cm) similar a la desviación estándar para GeoStatLiteUN (0.68 cm), esto se explica por la poca variabilidad del atributo evidenciada en el análisis exploratorio del tabla 3.2, lo que supeditó los modelos espaciales que en si muestran ser conservadores frente a dicha variabilidad.

Tabla 3.11. Características estructurales de los semivariogramas Esféricos y estadísticos de los modelos de superficie continua Kriging ordinario - GeoStatLiteUN y SAGA GIS.

Semivariograma ajustado	GeoStatLiteUN	SAGA GIS
Nugget (cm)²	5.27	5.6
Rango (m)	69.97	488.26
Full Sill (cm)²	6.97	7.1
Modelo Kriging ordinario (cm)	GeoStatLiteUN	SAGA GIS
Mínimo	47.03	46.12
Máximo	52.48	53.22
Media	49.93	49.96
Desviación estándar	0.68	1.02

La comparación visual de los modelos GeoStatLiteUN (figura 3.39a) y SAGA GIS (figura 3.9b) evidenció concordancia en su distribución, es decir que, el comportamiento espacial del fenómeno analizado fue similar.

Figura 3.9. Modelos Kriging Ordinario: GeoStatLiteUN (a) y SAGA GIS (b) - variable profundidad en la operación de roturación vertical.



Según los intervalos de confianza para los modelos GeoStatLiteUN y SAGA GIS (tabla 3.12), la media de la muestra estará en el 99% de los intervalos de confianza construidos con los estadísticos de los modelos espaciales desarrollados con base en la muestra (Diez *et al.*, 2019), con

lo anterior es razonable decir que el modelo construido con GeoStatLiteUN fue aceptable porque el intervalo de confianza contiene la media de la muestra y además fue muy similar al construido con SAGA GIS.

Tabla 3.12. Intervalos de confianza para los modelos GeoStatLiteUN y SAGA GIS

Límites - Intervalos de Confianza		
	GeoStatLiteUN	SAGA GIS
Límite Inferior (cm)	49.90	49.92
Límite Superior (cm)	49.96	50.00

3.4. Discusión

El uso del sistema GeoStatLiteUN permitió entender cómo se comportaron espacialmente las operaciones de fertilización mecánica a tasa variada y roturación vertical con cinceles rígidos en dos suelos gestionados para el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), cumpliendo con los requerimientos fundamentales para la creación de un mapa de variabilidad espacial a través del método Kriging ordinario tal como lo desarrolló Armstrong (1998) en su libro “Basic Linear Geostatistics”; cumpliéndose los requerimientos de conocer el volumen de datos recolectado, la distribución de la muestra, sus estadísticos descriptivos (media, desviación estándar, etc.), conocer si el fenómeno es estacionario, calcular varios semivariogramas con sus geoestadísticos y seleccionar el de mejor ajuste.

El análisis de las bases de datos correspondientes mostró que las medias de la distribución de los atributos de interés en las muestras fueron normales y simétricas, y que el comportamiento de los atributos y sus covariables espaciales fueron estacionarios de sentido amplio.

La comparación de los mapas de variabilidad espacial del sistema GeoStatLiteUN con SAGA GIS para las dos operaciones de mecanización agrícola estudiadas reflejó similitud en sus resultados; tanto en la distribución del atributo de interés como en los valores predichos con base en ponderaciones de la media de la muestra, aunque, los modelos de GeoStatLiteUN fueron más conservadores; lo que permitió afirmar con un 99% de confianza, que los modelos hechos con GeoStatLiteUN basarán sus predicciones en intervalos de confianza que contendrán la media de la muestra con límites más robustos (cercanos al Q1 y Q3).

3.5. Conclusiones

La contribución innovadora del sistema GeoStatLiteUN es la integración de protocolos automáticos para la: depuración basada en la prueba de Tukey para atípicos leves, la validación de la estacionariedad de sentido amplio, la construcción y selección de superficies continuas (mapas de variabilidad espacial); además, que se comparte como un archivo portable que posterior a su descarga no requiere conexión a internet, lo que facilitará el uso del sistema y el método geoestadístico Kriging ordinario a los profesionales del agro en el campo sin requerir conocimientos previos en los algoritmos matemáticos a usar.

El lenguaje de programación Python y sus módulos especializados permitieron la creación de un sistema de información geográfico de libre acceso enfocado en la construcción de mapas de variabilidad espacial con una interfaz gráfica de usuario (GeoStatLiteUN), que permitirá a los usuarios procesar y analizar datos espaciales en el ámbito de la agricultura digital.

El sistema GeoStatLiteUN logró resultados validos observando su similitud con el programa de amplia difusión SAGA GIS. Sin embargo, es necesario validar en campo los mapas

de variabilidad espacial para garantizar su eficiencia y apoyarse en un programa más robusto para la confección de planos convencionales.

3.6. Referencias

- Acevedo, C., Álvarez-Sánchez, M. E., Hernández-Acosta, E., Maldonado-Torres, R., Pérez-Grajales, M., y Castro-Brindis, R. (2008). Variabilidad espacial de propiedades químicas del suelo y su uso en el diseño de experimentos. *Terra Latinoamericana*, 26(4): 317-324. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792008000400004&lng=es&tlng=es
- Armstrong, M. (1998). *Basic Linear Geostatistics*. Editorial Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Estados Unidos. 154 pp. <https://www.springer.com/gp/book/9783540618454>.
- Bassoi, L. H., Bernardi, A. C., Cruvinel, P. E., Inamasu, R. Y., Speranza, E. A., y Vaz, C. M. (2019). Agricultura de precisión e agricultura digital. *TECCOGS*, 0(20): 17-36. <https://doi.org/10.23925/1984-3585.2019i20p17-36>
- Córdoba, M., Bruno, C., Balzarini, M., y Costa, J. (2012). Análisis de componentes principales con datos georreferenciados. Una aplicación en agricultura de precisión. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 44(1): 27-39. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=382837650003>
- Cravero, A., y Sepúlveda, S. (2021). Use and Adaptations of Machine Learning in Big Data-Applications in Real Cases in Agriculture. *Electronics.*, 10(5): 552. <https://doi.org/10.3390/electronics10050552>
- Diez, D., Barr, C., y Cetinkaya-Rundel, M. (2019). One-sample means with the t-distribution. En D. Diez, M. Cetinkaya-Rundel, y C. Barr (Edits.), *OpenIntro Statistics Fourth Edition* (OpenIntro ed., págs. 251-261). Estados Unidos: OpenIntro. <https://www.openintro.org/os>
- Fernández, D., y i Dasi, M. (2014). Uso de la geoestadística y los sistemas de información geográfica en agricultura. En E. Mantovani, & Magdalena Carlos (Edits.), *Manual de Agricultura de Precisión* (PROCISUR ed., págs. 84-91). Uruguay: PROCISUR. [http://www.procisur.org.uy/adjuntos/Manual AP_01web.pdf](http://www.procisur.org.uy/adjuntos/Manual_AP_01web.pdf). (Consultada 14 junio 2021).
- Gutiérrez-Lopez, A., Fuentes, C., Lebel, T., Ramirez, A., y Santillán, O. (2012). El variograma y el correlograma, dos estimadores de la variabilidad de mediciones hidrológicas. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 0(59): 193-202. <https://revistas.udea.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/13824>
- Herrera-Gómez, A., y Reinoso-Gutierrez, J. (2016). Diseño e Implementación de una Aplicación SIG para la Supervisión y Monitoreo de Sensores en el Campo de la Agricultura de Precisión. Tesis de Grado, Universidad de los Llanos. Colombia. <https://repositorio.unillanos.edu.co/handle/001/1172>
- Jaramillo-Jaramillo, D. (2012). Variabilidad espacial del suelo: bases para su estudio. *Revista de la Facultad de Ciencias*, 1(1): 73-87. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rfc/article/view/49004>
- Kamilaris, A., Kartakoullis, A., y Prenafeta-Boldú, F. (2017). A review on the practice of big data analysis in agriculture. *Comput. Electron. Agric.*, 143: 23-37. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.09.037>.
- Kim, S. hee., Kang, M. S., y Jung, Y. G. (2016). Big data Analysis using Python in Agriculture Forestry and Fisheries. *International Journal of Advanced Smart Convergence*, 5(1): 47-50. <https://doi.org/10.7236/IJASC.2016.5.1.47>
- Lago-González, C., Sepúlveda-Peña, J., Barroso-Abreu, R., Fernández-Peña, F., Maciá-Pérez, F., y Lorenzo, J. (2011). Sistema para la generación automática de mapas de rendimiento.

- Aplicación en la agricultura de precisión. *Idesia (Arica)*, 29(1): 59-69. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292011000100009>.
- Loayza, V., Sevilla, V., Olivera, C., Guevara, M., Olmedo, G., Vargas, R., Oyonarte, C., y Jiménez, W. (2020). Mapeo digital de carbono orgánico en suelos de Ecuador. *Ecosistemas* 29(1): 1852. <https://doi.org/10.7818/ECOS.1852>.
- Paccioretti, P., Balzarini, M., y Córdoba, M. (2020). Desarrollo de un software para mapeo de variabilidad espacial en agricultura y ambiente. *AgriScientia*, 37(1): 75-84. <https://doi.org/10.31047/1668.298x.v37.n1.27863>. (Consultada 20 junio 2021).
- Saavedra-Rincon, S. (2018). Fertilización nitrogenada a tasa variada en seis campos de caña de azúcar: hacia un manejo ambiental sostenible bajo el concepto de agricultura de precisión. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia. Palmira, Valle del Cauca, Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69043>
- Salgado-Velázquez, S., Salgado-García, S., Rincón-Ramírez, J.A. et al. (2020). Spatial Variability of Soil Physicochemical Properties in Agricultural Fields Cultivated with Sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) in Southeastern Mexico. *Sugar Tech*, 22:65–75. <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00742-9>
- Stephan, A., Holzäpfel, F., y Schrall, J. (2016). Numerical Optimization of Plate-Line Design for Enhanced Wake-Vortex Decay. *Journal of Aircraft*, 54(3): 995-1010. <https://doi.org/10.2514/1.C033973>
- Villatoro, M., Henríquez, C., y Sancho, F. (2008). Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agron. Costarricense*, 32(1): 95-105. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6773>
- Yescas-Coronado, P., Álvarez-Reyna, V., García-Carrillo, M., González-Cervantes, G., Hernández-Hernández, V., y Segura-Castruita, M. (2018). Variabilidad Espacial del Carbono Orgánico e Inorgánico del Suelo en la Comarca Lagunera, México. *Bol. Soc. Geol. Mex.*, 70(3): 591-610. <https://doi.org/10.18268/BSGM2018v70n3a2>

Capítulo IV

IV. COMPACTACIÓN INDUCIDA DURANTE LA COSECHA MECÁNICA DE *Saccharum spp.*: RELACIÓN CON PROPIEDADES ESTRUCTURALES DEL SUELO E INTENSIDAD DE TRÁFICO

Resumen

En este estudio, se caracterizó espacialmente la compactación inducida ocasionada por las intensidades de tráfico durante la cosecha mecánica de *Saccharum spp.* (caña de azúcar) con vagones auto volteo y relacionó la compactación inducida con la intensidad de tráfico; esto, en un suelo de textura arcillosa y un suelo de textura franca del municipio de Palmira en la región del Valle del Cauca. Se evaluó la resistencia mecánica a la penetración y la densidad aparente en húmedo, prestando especial atención a su variabilidad espacial. Los resultados del estudio revelaron que la densidad aparente en húmedo inicial tuvo un impacto significativo en la compactación del suelo en estudio. Cuando la densidad aparente en húmedo fue mayor (1.67 Mg/m^3), se observó una menor susceptibilidad a la compactación, con una resistencia mecánica a la penetración promedio máxima de 1.83 MPa. Por otro lado, cuando la densidad aparente en húmedo fue menor (1.56 Mg/m^3), se produjo una mayor compactación, con una resistencia mecánica a la penetración promedio máxima de 2.46 MPa. Se concluyó que intensidades de tráfico iguales o superiores a 612.12 Mg.km/ha durante la cosecha de la caña de azúcar favorecieron la compactación en las capas superficiales del suelo ($< 30 \text{ cm}$ de profundidad), lo que resultó en valores críticos de densidad del suelo y resistencia mecánica a la penetración. Además, se observó que la propagación horizontal de la compactación varió dependiendo de la densidad aparente en húmedo: aumentó significativamente (18.77 m) cuando la densidad aparente en húmedo era menor (1.56 Mg/m^3) y disminuyó (4.55 m) cuando era mayor (1.67 Mg/m^3). Además, el estudio aportó un modelo matemático que pudo explicar el 50% de la variabilidad en el fenómeno de compactación inducida con un nivel de confianza del 95%.

Palabras clave: densidad aparente, penetrabilidad, caña de azúcar, tráfico.

4.1. Introducción

El fenómeno de la compactación en los suelos, ocasiona una reducción importante de la productividad en los sistemas agrícolas, especialmente aquellos donde el tráfico agrícola transfiere al suelo una alta carga mecánica, causando un aumento en la resistencia mecánica a la penetración y la densidad aparente (en húmedo y seco), situación que a su vez disminuye la porosidad, la conductividad hidráulica y la disponibilidad de nutrientes; se afecta la calidad de los suelos y se reduce el rendimiento de los cultivos a través del crecimiento atrofiado de las plantas sobre las superficie y un crecimiento reducido de sus raíces (Shah *et al.*, 2017; Antille *et al.*, 2019).

En Colombia la producción de *Saccharum spp.* (caña de azúcar), se realiza de manera intensiva en el valle geográfico del río Cauca, se emplea para las operaciones de cosecha mecánica una flota de maquinaria compuesta generalmente por una cosechadora, dos tractores y vagones de auto volteo para la carga y transporte del material recolectado, que transitan sobre el suelo durante la ejecución de la operación.

Las cosechadoras mecánicas suelen emplear motores con potencias máximas de 262.5 kW (352 HP) a 2 100 min y una velocidad de avance cercana a los 9 km/h, su peso sin carga esta alrededor de los 184.42 kN (que corresponde a una masa de 18.50 Mg); los tractores empleados para el arrastre de los vagones auto volteo tienen potencias cercanas a los 136 kW (182 HP) y un peso aproximado es de 127.49 kN (una masa de 13 Mg); por su parte, los vagones auto volteo para el cargue y transporte del material tienen un peso sin carga aproximado de 68.64 kN (equivalente a una masa de 7 Mg) y una capacidad de carga de 107.87 kN (equivalente a una masa de 11 Mg).

La presión sobre el suelo ocasionado por la tracción de la maquinaria sobre, dentro y cerca de la superficie de contacto de sus sistema de rodamiento en el suelo, se distribuye de forma parabólica y son proporcionales a su peso, con variaciones que dependen del diámetro y ancho de los neumáticos, la configuración del sistema de rodado del vehículo (llantas únicas o duales), superficie de contacto del área rectangular de la oruga (cosechadoras), la construcción y banda de rodadura, la velocidad de avance del vehículo y el número de veces que transiten sobre una misma superficie de suelo (Koolen y Kuipers, 1983; Keller *et al.*, 2019).

La intensidad de tráfico (IT) en las operaciones de mecanización, es un parámetro que se asocia a el peso de la maquinaria e implementos agrícolas (vinculado con la presión que se trasmite al suelo) y la permanencia sobre o cerca del suelo y se usa para caracterizar la distribución del tránsito de maquinaria e implementos sobre el suelo, tránsito que afecta las condiciones físicas estructurales de los mismos.

Rodríguez y Valencia (2012) en un experimento en el valle del río Cauca, Colombia con diferentes sistemas de cosecha de caña de azúcar en términos de vagones de carga: pesados de alta capacidad (11 Mg e IT de 317 Mg.km/ha) y livianos de menor capacidad (6 Mg e IT de 241 Mg.km/ha); encontraron que se causó menor compactación superficial y subsuperficial cuando se hizo la cosecha con vagones livianos y de menor capacidad, encontrando en el suelo valores de resistencia mecánica a la penetración de menor magnitud comparados con el sistema de vagones pesados de alta capacidad.

Por otro lado; Panziera *et al.* (2020) determinaron el impacto del tráfico en la operación de cosecha mecánica de caña de azúcar al evaluar la variabilidad espacial de la densidad aparente y la resistencia mecánica a la penetración de dos suelos sometidos a dos diferentes sistemas de siembra (una fila de siembra por surco y doble fila de siembra por surco) en el estado de Rio Grande do Sul, Brasil; y mostraron que el sistema de doble fila de siembra por surco disminuyo el tráfico sobre el suelo durante la operación de cosecha mecánica; lo que mitigo el problema de compactación, pisoteo de las plantas y promovió unas mejores condiciones físicas estructurales, encontrando valores medios de densidad aparente y resistencia mecánica a la penetración menores (1.40 Mg/m³ y 2.49 MPa respectivamente) comparados con el sistema de una fila de siembra por surco (1.44 Mg/m³ y 2.68 MPa, respectivamente).

En los procesos de mecanización agrícola, el movimiento y la permanencia de las máquinas e implementos sobre el suelo afecta sus condiciones físicas y consecuentemente la producción de los cultivos, para su adecuada comprensión y búsqueda de soluciones que mitiguen el impacto negativo de la compactación, se requiere, además de los conceptos aportados por disciplinas como la terramecánica y la dinámica de suelos, el uso de nuevas técnicas (como la geoestadística) y tecnologías (como los sistemas de navegación asistida y los sistemas de información geográfica), así como el apoyo en las tecnologías emergentes innovadoras propias de la denominada cuarta revolución industrial (agricultura digital), de esta forma se podrá disponer de estrategias de gestión para recopilar, procesar y analizar datos de los agroecosistemas para mejorar la eficiencia en el uso de los recursos, la productividad, la calidad, la rentabilidad y la sostenibilidad de la producción

agraria; que se originan desde el esfuerzo de la multidisciplinariedad (Gill y Vanden-Berg, 1980; Hillel, 2013; Liu *et al*, 2020).

El objetivo de la presente investigación fue caracterizar espacialmente la compactación inducida ocasionada por las intensidades de tráfico durante la cosecha mecánica de *Saccharum spp.* (caña de azúcar) con vagones auto volteo y se relacionar la compactación inducida con la intensidad de tráfico, en un suelo de textura arcillosa y un suelo de textura franca del municipio de Palmira en la región del Valle del Cauca.

4.2. Materiales y métodos

4.2.1. Área de estudio

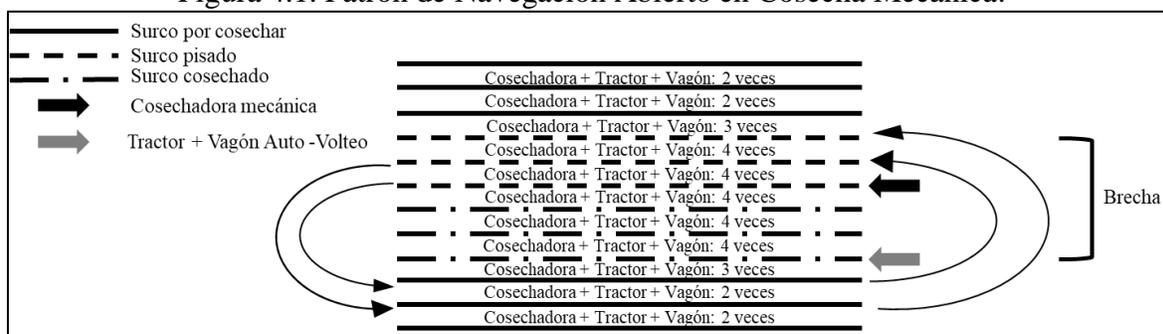
El área de estudio se localizó en el departamento del Valle del Cauca, Colombia y comprendió dos porciones de suelo de aproximadamente 6 930 m² sembrados con caña de azúcar para producción orgánica (lote A) con la variedad CC 05-430 y producción convencional (lote B) con la CC 09-066. Cada lote albergó un total de 35 surcos, con una separación entre surcos de 1.65 m y una longitud promedio de surco de 120 m. Según las coordenadas geográficas WGS84 el lote A se ubicó en 3°35'17.56"N - 76°18'52.98"O y el lote B en 3°29'55.87"N - 76°18'45.77"O.

El lote A está ubicado en un área con propiedades biofísicas relativamente homogéneas, que se puede caracterizar por cobijar suelos de orden Mollisol, formados sobre material aluvial, con distribución irregular de carbono orgánico; de textura franca fina y franca fina sobre arcillosa y con contenido de arcilla menor del 35%; moderadamente bien drenados y bien drenados, moderadamente profundos y profundos; se encuentran ubicados en un relieve plano (pendientes de 0-1%) con permeabilidad alta, moderada y baja; dentro de una región con déficit de humedad y rendimientos promedios de 130 Mg de caña de azúcar por hectárea. El lote B en un área con suelos Vertisoles típicos, de texturas finas y contenidos de arcilla entre 35% y 60%, moderadamente drenados y bien drenados, moderadamente profundos y bien profundos; con permeabilidades altas, moderadas y bajas; dentro de una región con humedades menores a 200 mm/año y rendimientos promedios de 142 Mg de caña de azúcar por hectárea (Carbonell-González *et al*, 2011).

4.2.2. Operación de cosecha

En la operación de cosecha mecanizada de caña de azúcar se planificó que la maquina cosechadora (presión estimada de contacto 156.9 kPa oruga - suelo) fuese acompañada por el tractor (presión de inflado llantas delanteras 103.4 kPa y traseras 158.6 kPa) y el vagón auto volteo (presión de inflado llantas delanteras y traseras 296.5 kPa) con una separación entre sí de dos surcos; y se inició con la cosecha de tres surcos sucesivos ubicados en la mitad de las superficies de los lotes, acción que dio lugar a una brecha de seis surcos (tres cosechados y tres pisados por la combinación tractor – vagón auto volteo); una vez culminada la acción de cosechar los tres surcos iniciales, la operación continuó con la cosecha de los surcos pisados con un patrón de navegación abierto que finalizó hasta que se alcanzó todo el conjunto de treinta y cinco surcos; lo anterior garantizó que la combinación tractor – vagón auto volteo siempre tránsito sobre surcos cosechados, una vez se hizo la brecha (figura 4.1).

Figura 4.1. Patrón de Navegación Abierto en Cosecha Mecánica.



La navegación de cosecha mecanizada anterior tiene como característica que sobre los seis surcos de la brecha transitan dos veces la combinación tractor – vagón auto volteo y sobre los contiguos una sola vez, arrojando tres IT (intensidades de tráfico) diferentes sobre el suelo de las entre calles del conjunto de surcos cosechados, teniendo en cuenta la cantidad de veces que pasa el sistema de rodado de la maquinaria utilizada.

4.2.3. Muestreo y variables de interés

Del conjunto de treinta y cinco surcos se seleccionaron doce: seis pertenecientes a la brecha y seis más contiguos; los sujetos de estudio fueron las entre calles contenidas entre los doce surcos (un total de once); los tratamientos correspondieron a las tres IT que se generaron durante la operación de cosecha y un testigo correspondiente a las condiciones del suelo antes de iniciar la operación de cosecha mecanizada (tabla 4.1); las variables de respuesta fueron RP (resistencia mecánica a la penetración) estimada hasta los 50 cm de profundidad y DaH (densidad aparente en húmedo) estimada hasta los 15 cm de profundidad; configurando el diseño del experimento como completamente al azar.

Tabla 4.1. Condiciones e intensidad de tráfico por tratamiento durante el experimento.

Tratamientos	Descripción
Testigo	Condiciones iniciales antes de cosecha mecanizada
IT1	Dos pasadas de cosechadora, tractor y vagón auto volteo
IT2	Dos pasadas de cosechadora y tres pasadas de tractor y vagón auto volteo
IT3	Dos pasadas de cosechadora y cuatro pasadas de tractor y vagón auto volteo

IT = Intensidad de tráfico

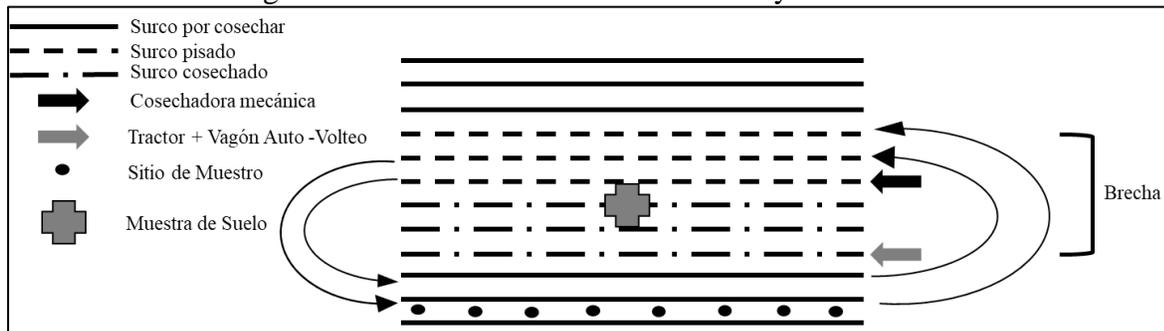
Se tuvo en cuenta la falta de una distribución normal por las características del estudio y de acuerdo con lo expresado por Montiel-Torres y Blanco-Sepúlveda (2001), se estableció un diseño experimental completamente al azar y una selección aleatoria sistemática para los sitios de muestreo del experimento; se tomó una primera entre calle como referencia y asignando zonas de muestreo a lo largo cada 15 m, para un total de ocho sitios de muestro por entre calle; así pues, para las entre calles restantes los sitios de muestreo fueron determinados a partir de la posición relativa de los sitios de la entre calle de referencia (figura 4.2); a cada sitio de muestro se le capturo sus coordenadas proyectadas en un sistema de referencia plano Magna Colombia – Zona Oeste, de tal forma que a los datos asociados a las variables de interés se les pudo hacer un análisis espacial.

Para propósitos de caracterización, se tomó en cada lote una muestra de suelo dentro de las fronteras espaciales de los surcos seleccionados (figura 4.2) antes de la operación de cosecha mecánica con vagones auto volteo y después de la operación de cosecha mecanizada, para conocer

en términos generales: los contenidos de humedad por unidad de masa de suelo (%W) en los momentos mencionados acorde al método planteado por Lucero-Vega *et al.* (2017) y los límites de los estados de consistencia plástico y líquido acorde al método planteado por Hernández-Sánchez *et al.* (2019), y su distribución de tamaño de partículas siguiendo el método de Bouyoucos. A su vez, se tomaron en cada lote 30 kg de suelo para someterlas a la prueba de compactación de Proctor Estándar y delimitar la densidad aparente máxima y la humedad crítica ($W_{crítica}$); para esto, se utilizó un equipo manual, compuesto por un molde cilíndrico de 101.6 mm de diámetro interior, 116.4 mm de altura para un volumen de 944 cm³ y un martillo de 50.8 mm de diámetro y peso de 2.5 kg.

Para la medición de RP se usó un sensor penetrómetro electrónico para mediciones *in situ* con las siguientes especificaciones técnicas: ángulo de cono de 60°, 1 cm² de superficie de cono con una resolución de 10 MPa (Davidson, 1965); para la estimación de la DaH se usó un cilindro de acero inoxidable con puntas afiladas con las siguientes dimensiones: diámetro de 13 cm, altura de 15 cm y volumen aproximado de 1991 cm³, determinadas a partir de lo expresado por de-Moraes *et al.* (2014) para obtener una mejor correlación con los valores de RP; para la determinación de la IT se usó el método planteado por Rodríguez y Valencia (2012) y se consideró la masa del vagón auto volteo como el promedio de la masa sin carga y su capacidad de carga; la captura de las coordenadas en los sitios de muestreo se realizó con un dispositivo para navegación de mano con receptor de alta sensibilidad y compatibilidad con varios sistemas globales de navegación por satélite (GNSS).

Figura 4.2. Distribución sitios de muestreo y muestra de suelo.



4.2.4. Análisis de la información

Las variables de interés se sometieron a pruebas de la estadística descriptiva para el total de los datos y discriminados por tratamiento, prueba Shapiro-Wilk de distribución normal ($\alpha = 0.05$) para el total de los datos y análisis de varianza para determinar la significatividad estadística ($\alpha = 0.05$) de las diferencias observadas entre los tratamientos. Cuando existieron diferencias significativas, se utilizó la prueba Post Hoc de Diferencia Honesta Significativa de Tukey ($\alpha = 0.05$) para perfilar cual o cuales tratamientos fueron diferentes entre sí, para cada una de las variables de interés. Para la variable RP se complementó el análisis de varianza con un estudio Post Hoc de Diferencia Honesta Significativa de Tukey ($\alpha = 0.05$) por estratos de 10 cm hasta alcanzar la profundidad evaluada.

Para relacionar las variables de interés con la IT se hizo uso de los métodos estadísticos de regresión y correlación lineales de Pearson aplicada a una base de datos que contuvo información de todas las entre calles de uno de los suelos seleccionados que evidenció de mejor forma las diferencias significativas entre los tratamientos; la combinación para encontrar la ecuación lineal

fue: RP, DaH versus IT. La potencia del modelo se comprobó a través de la desviación estándar de los valores residuales (RMSE), indicador construido con información de DaH y RP promedio de dos entre calles que fueron sometidas a intensidades de tráfico de 212.12 Mg.km/ha y 345.45, respectivamente; de una porción de suelo cultivado con caña de azúcar, en condiciones de humedad y factores biofísicos de largo plazo generalmente estables similares al suelo seleccionado; pero con distribución de partículas diferente (37% arcilla, 34% limo y 29% arena).

Posteriormente, los valores de DaH y los promedios de RP en la profundidad evaluada asociados a covariables espaciales de cada uno de los sitios de muestreo en cada sujeto de estudio fueron sometidos a un análisis geoestadístico para generar superficies continuas univariadas mediante el método Kriging ordinario bajo el supuesto de isotropía, cumpliendo con los requerimientos expresados por Matheron (2019); y discriminando los información en dos momentos: antes de la operación de cosecha mecanizada (datos Testigo) y después de la operación de cosecha mecanizada (datos IT1, IT2 e IT3), lo que permitió conocer y caracterizar el comportamiento espacial de DaH y el promedio de la RP en la profundidad evaluada, debido a los tratamientos aplicados sobre los sujetos de estudio.

Las pruebas de la estadística descriptiva y normalidad, los análisis estadísticos para determinar diferencias significativas entre los tratamientos y los métodos relacionar la RP y la DaH con la IT se programaron con los módulos especializados del ecosistema Python (Python 3.9.5): pandas v1.2.4, SciPy v1.20.3, NumPy v1.20.0, statsmodels v0.12.2 y scikit-learn v1.1.1. Para los análisis geoestadísticos se usó el programa GeoStatLiteUN v2021.6.1.

4.3. Resultados

4.3.1. Análisis de la información – Lote A

Los resultados mostraron un comportamiento ascendente de la IT en correspondencia con el incremento de la frecuencia de tránsito y carga por unidad de área asociado a la maquinaria de cosecha (tabla 4.2). La cosechadora combinada aportó una IT de 106.1 Mg.km/ha, el tractor de 78.8 Mg.km/ha y el vagón auto volteo de 54.5 Mg.km/ha.

Tabla 4.2. Valores de IT por tratamiento.

Tratamientos	Valor (Mg.km/ha)
Testigo	0
IT 1	478.79
IT 2	612.12
IT 3	745.45

El suelo contó con un %W de 38.4 antes de iniciar la operación de cosecha y un %W de 33.7 inmediatamente después de culminar la operación.

Tabla 4.3. Caracterización del suelo en el lote A.

Partículas	Distribución (%)
Arcillas	21.6
Limo	46.0
Arena	32.4
Consistencia	W(%)
Limite plástico	25.0
Limite líquido	41.0

4.3.1.1. DaH Lote A

La base de datos para la variable DaH estuvo conformada por 176 datos a los cuales se les asocio número de entre calle, sitio de muestro y tratamiento; distribuidos de la siguiente forma: Testigo 88 datos, IT1 32 datos, IT2 16 datos e IT3 40 datos. La estadística descriptiva (tabla 4.4) arrojó valores de media, mediana y moda similares; y aunque no se evidenció simetría y comportamiento normal, invocando el teorema del límite central, se pudo decir, por la cantidad de datos, que la media de la distribución de la muestra tiende a ser normal y simétrica.

Tabla 4.4. Datos DaH y RP - Estadística descriptiva.

	DaH		RP
Media (Mg/m ³)	1.62	Media (MPa)	2.15
Mediana (Mg/m ³)	1.63	Mediana (MPa)	2.12
Moda (Mg/m ³)	1.77	Moda (MPa)	2.33
Desviación estándar (Mg/m ³)	0.16	Desviación estándar (MPa)	0.69
Varianza de la muestra (Mg ² /m ⁶)	0.03	Varianza de la muestra (MPa ²)	0.47
Simetría	-0.52	Simetría	0.29
Normalidad P-Valor	< 0.001	Normalidad P-Valor	0.01
Mínimo (Mg/m ³)	1.32	Mínimo (MPa)	0.33
Máximo (Mg/m ³)	1.79	Máximo (MPa)	4.42

*P-Valor prueba de Shapiro-Wilk ($\alpha = 0.05$).

El análisis de varianza para la variable DaH (tabla 4.5) estableció diferencias significativas entre los tratamientos evaluados producto del patrón de navegación durante la operación de cosecha mecanizada de caña de azúcar, diferencias (tabla 4.6) que se manifestaron entre el Testigo, IT1 e IT3; la usencia de diferencia estadística entre el Testigo e IT2 pudo deberse a cantidad de datos registrados de este último, aunque, el valor de la media de IT2 fue mayor.

Tabla 4.5. Análisis de Varianza – Datos DaH y RP

Tratamientos	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor-P
DaH	3	0.76	0.250	< 0.001
Residual DaH	172	3.87	0.022	
RP	3	50.93	16.98	< 0.001
Residual RP	514	192.95	0.37	

*($\alpha = 0.05$).

Frente a los niveles de intensidad de tráfico; IT1, IT2 e IT3 se encontró que la DaH no tuvo diferencias significativas (tabla 4.6); pese a la variación en términos de IT que poseen.

Tabla 4.6. Datos DaH y RP – Descriptivos por tratamiento

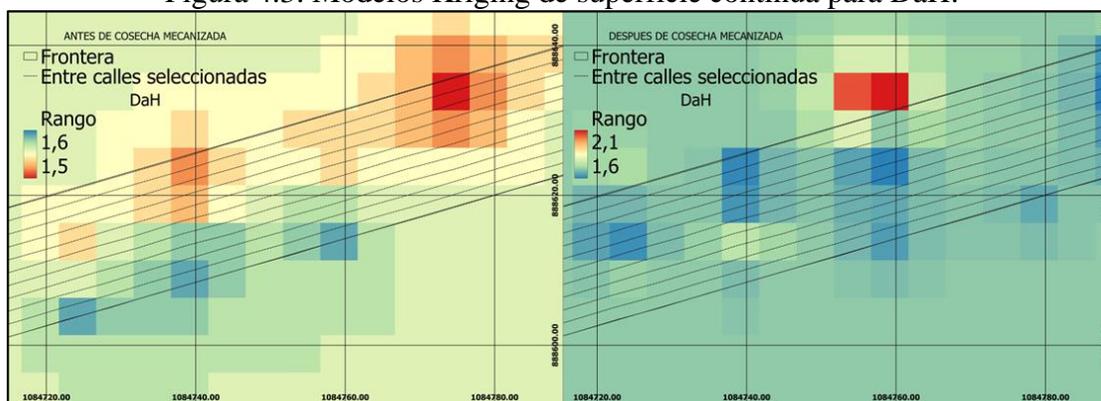
Estadísticos	Testigo	IT1	IT2	IT3
DaH				
Media (Mg/m³)	1.56A	1.73B	1.63AB	1.66B
Desviación estándar (Mg/m³)	0.12	0.27	0.09	0.10
Varianza de la muestra (Mg²/m⁶)	0.01	0.07	0.01	0.01
RP				

Media (MPa)	1.43A	2.20B	2.46C	2.26BC
Desviación estándar (MPa)	0.42	0.66	0.53	0.64
Varianza de la muestra (MPa²)	0.18	0.44	0.28	0.41

*Media con letras diferentes indican diferencias significativas según prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Las mejores superficies continuas de DaH correspondiente a los momentos: antes y después de la operación de cosecha mecanizada (figura 4.3), resultaron de un modelo de variograma exponencial con débil (nugget > 75% del Sill) y fuerte (nugget < 25% del Sill) dependencia espacial, respectivamente. Los rangos que indican la magnitud de la variabilidad espacial fueron de 18.77 m (antes) y 8.76 m (después); observándose una mayor variación de DaH después de la cosecha mecanizada (entre 1.6 Mg/m³ y 2.1 Mg/m³) frente a la DaH antes de la operación (entre 1.5 Mg/m³ y 1.6 Mg/m³).

Figura 4.3. Modelos Kriging de superficie continua para DaH.



4.3.1.2. RP Lote A

La base de datos para la variable RP estuvo conformada por 518 datos a los cuales se les asocio número de entre calle, sitio de muestro y tratamiento; distribuidos de la siguiente forma: Testigo 78 datos, IT1 160 datos, IT2 80 datos e IT3 200 datos. La estadística descriptiva (tabla 4.4) evidenció simetría y aunque no se observó comportamiento normal, invocando el teorema del límite central, se pudo decir, por la cantidad de datos, que la media de la distribución de la muestra tiende a ser normal y simétrica.

El análisis de varianza para la variable RP (tabla 4.5) estableció diferencias significativas entre los tratamientos evaluados producto del patrón de navegación durante la operación de cosecha mecanizada de caña de azúcar, diferencias (tabla 4.6) que se manifestaron entre el Testigo, IT1, IT2 e IT3.

Tabla 4.7. Datos RP – Valores medios estratificados por tratamiento.

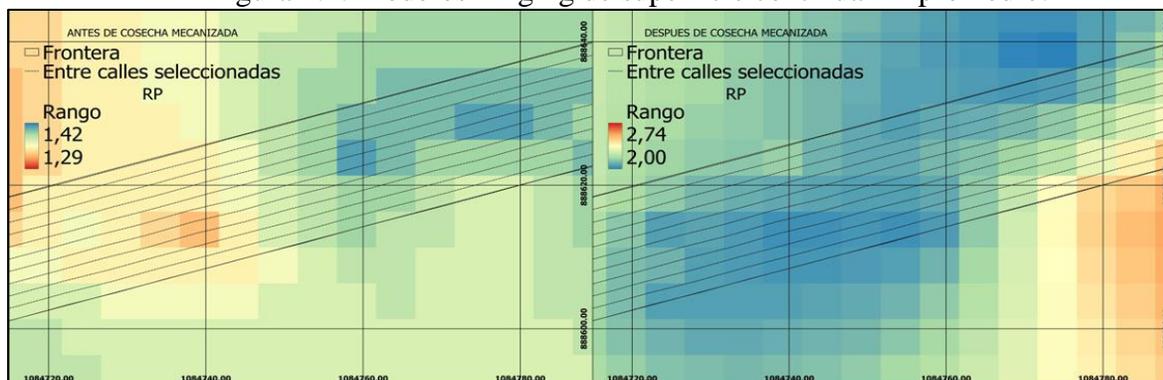
Estadísticos (MPa)	Testigo	IT1	IT2	IT3
Media 0 – 10 cm	0.78Aa (100%)	1.60Ba (205%)	1.93Ba (247%)	1.81Ba (232%)
Media 10 – 20 cm	1.30Ab (100%)	1.97Ba (151%)	2.45Cb (188%)	2.18Bcab (168%)
Media 20 – 30 cm	1.55Abc (100%)	2.53Bb (163%)	2.75Bb (177%)	2.45Bb (158%)
Media 30 – 40 cm	1.66Abcd (100%)	2.53Bb (152%)	2.86Bb (172%)	2.43Bb (146%)
Media 40 – 50 cm	1.80Abcd (100%)	2.40Bb (133%)	2.53Bb (140%)	2.26Bb (125%)

*Media en filas con letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas según prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

*Media en columnas con letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas según prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Las mejores superficies continuas de RP correspondiente a los momentos: antes y después de la operación de cosecha mecanizada (figura 4.4), resultaron de un modelo de variograma esférico con fuerte (nugget < 25% del Sill) y moderada (nugget 25% - 50% del Sill) dependencia espacial, respectivamente. Los rangos que indican la magnitud de la variabilidad espacial fueron de 30.32 m (antes) y 18.30 m (después); observándose una mayor variación de la RP después de la cosecha mecanizada (entre 2.00 MPa y 2.74 MPa) frente a la RP antes de la operación (entre 1.29 MPa y 1.42 MPa).

Figura 4.4. Modelos Kriging de superficie continua RP promedio.



4.3.2. Análisis de la información – Lote B

Debido al patrón de navegación durante la cosecha mecanizada en el lote B, se tuvo una IT ascendente desde el testigo hasta el tratamiento IT3 (pasando por IT1 e IT2) igual a la presentada en la tabla 4.2; apreciándose que a mayor IT aumenta la frecuencia de tránsito y carga por unidad de área asociado a la maquinaria de cosecha; la máquina cosechadora combinada aportó una IT de 106.1 Mg.km/ha, el tractor una IT de 78.8 Mg.km/ha y el vagón auto volteo una IT de 54.5 Mg.km/ha.

Tabla 4.8. Caracterización suelo lote

Partículas	Distribución (%)
Arcillas	48.0
Limo	26.0
Arena	26.0
Consistencia	% W
Limite plástico	16.5
Limite líquido	39.8

El suelo contó con un % W de 35.7 antes de iniciar la operación de cosecha y un % W de 33.8 inmediatamente después de culminar la operación.

4.3.2.1. DaH Lote B

La base de datos para la variable DaH estuvo conformada por 176 datos a los cuales se les asocio número de entre calle, sitio de muestro y tratamiento; distribuidos de la siguiente forma: Testigo 88 datos, IT1 32 datos, IT2 16 datos e IT3 40 datos.

Tabla 4.9. Datos DaH y RP - Estadística descriptiva.

	DaH		RP
Media (Mg/m³)	1.68	Media (MPa)	1.76
Mediana (Mg/m³)	1.70	Mediana (MPa)	1.67
Moda (Mg/m³)	1.79	Moda (MPa)	1.96
Desviación estándar (Mg/m³)	0.10	Desviación estándar (MPa)	0.85
Varianza de la muestra (Mg²/m⁶)	0.01	Varianza de la muestra (MPa²)	0.72
Simetría	-1.14	Simetría	1.39
Normalidad P-Valor	< 0.001	Normalidad P-Valor	< 0.001
Mínimo (Mg/m³)	1.23	Mínimo (MPa)	0.29
Máximo (Mg/m³)	1.81	Máximo (MPa)	5.44

*P-Valor prueba de Shapiro-Wilk ($\alpha = 0.05$).

La estadística descriptiva (tabla 4.9) arrojó valores de media, mediana y moda similares, con un comportamiento simétrico sin evidencia de normalidad; invocando el teorema del límite central, se pudo decir, por la cantidad de datos, que la media de la distribución de la muestra tiende a ser normal.

Tabla 4.10. Análisis de Varianza – Datos DaH y RP.

Tratamientos	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor-P
DaH	3	0.026	0.009	0.491
Residual DaH	172	1.862	0.011	
RP	3	11.36	3.78	0.001
Residual RP	516	363.85	0.71	

*($\alpha = 0.05$).

El análisis de varianza para la variable DaH (tabla 4.10) no estableció diferencias significativas entre los tratamientos evaluados producto del patrón de navegación durante la operación de cosecha mecanizada de caña de azúcar; pese a la variación en términos de IT que poseen (tabla 4.11).

Tabla 4.11. Datos DaH – Descriptivos por tratamiento.

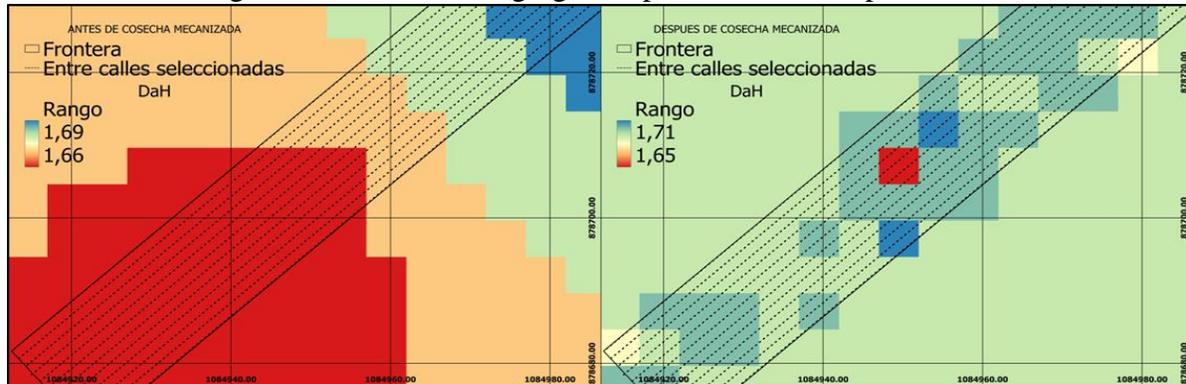
Estadísticos	Testigo	IT1	IT2	IT3
DaH				
Media (Mg/m³)	1.67A	1.70A	1.70A	1.69A
Desviación estándar (Mg/m³)	0.09	0.10	0.12	0.13
Varianza de la muestra (Mg²/m⁶)	0.01	0.01	0.01	0.02
RP				
Media (MPa)	1.41A	1.83B	1.79B	1.83B
Desviación estándar (MPa)	0.66	0.88	0.74	0.91
Varianza de la muestra (MPa²)	0.43	0.77	0.54	0.83

*Media con letras diferentes indican diferencias significativas según prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Las mejores superficies continuas de DaH correspondiente a los momentos: antes y después de la operación de cosecha mecanizada (figura 4.5), resultaron de un modelo de variograma esférico con débil (nugget > 75% del Sill) dependencia espacial. Los rangos que indican la

magnitud de la variabilidad espacial fueron de 88.70 m (antes) y 4.16 m (después); observándose una mayor variación de DaH después de la cosecha mecanizada (entre 1.65 Mg/m³ y 1.71 Mg/m³) frente a la DaH antes de la operación (entre 1.66 Mg/m³ y 1.69 Mg/m³).

Figura 4.5. Modelos Kriging de superficie continua para DaH.



4.3.2.2. RP Lote B

La base de datos para la variable RP estuvo conformada por 518 datos a los cuales se les asocio número de entre calle, sitio de muestro y tratamiento; distribuidos de la siguiente forma: Testigo 78 datos, IT1 160 datos, IT2 80 datos e IT3 200 datos. La estadística descriptiva (tabla 4.9) evidenció simetría y aunque no se observó comportamiento normal, invocando el teorema del límite central, se pudo decir, por la cantidad de datos, que la media de la distribución de la muestra tiende a ser normal y simétrica.

El análisis de varianza para la variable RP (tabla 4.10) estableció diferencias significativas entre los tratamientos evaluados producto del patrón de navegación durante la operación de cosecha mecanizada de caña de azúcar, diferencias (tabla 4.11) que se manifestaron entre el Testigo, IT1, IT2 e IT3. Lo anterior denota una relación manifiesta entre la IT y RP.

Tabla 4.12. Datos RP – Valores medios estratificados por tratamiento.

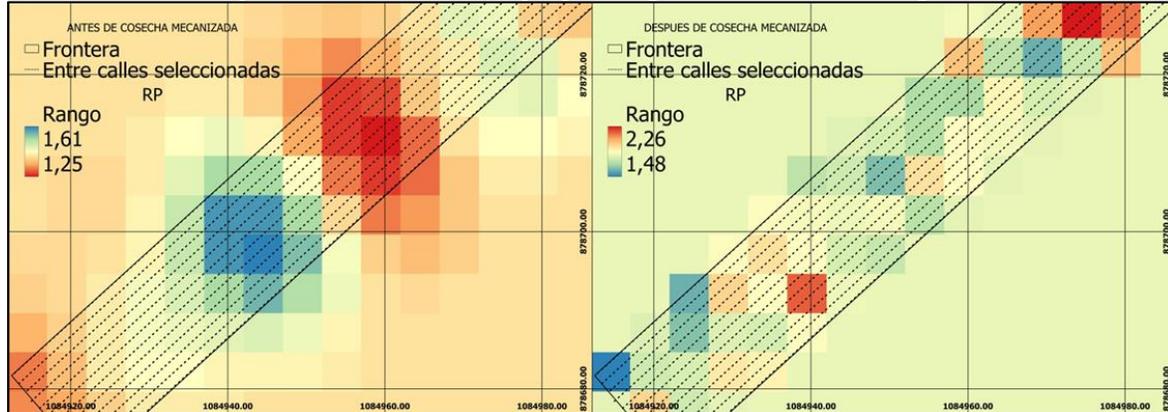
Estadísticos (MPa)	Testigo	IT1	IT2	IT3
Media 0 – 10 cm	0.66Aa (100%)	1.06Ba (160%)	1.11Ba (168%)	1.04Ba (157%)
Media 10 – 20 cm	1.03Aa (100%)	1.47Bab (143%)	1.59Bab (154%)	1.41Bab (137%)
Media 20 – 30 cm	1.33Ab (100%)	1.84Bbc (138%)	2.02Bb (152%)	1.82Bb (137%)
Media 30 – 40 cm	1.86Abc (100%)	2.28Abcd (122%)	2.10Ab (113%)	2.38Abc (128%)
Media 40 – 50 cm	2.05Abc (100%)	2.5Abcd (122%)	2.15Ab (105%)	2.48Abc (121%)

*Media en filas con letras mayúsculas diferentes indican diferencias significativas según prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

*Media en columnas con letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas según prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

Las mejores superficies continuas de RP correspondiente a los momentos: antes y después de la operación de cosecha mecanizada (figura 4.6), resultaron de un modelo de variograma esférico con moderada (nugget 25% - 50% del Sill) dependencia espacial. Los rangos que indican la magnitud de la variabilidad espacial fueron de 18.89 m (antes) y 4.55 m (después); observándose una mayor variación de la RP después de la cosecha mecanizada (entre 1.48 MPa y 2.26 MPa) frente a la RP antes de la operación (entre 1.25 MPa y 1.61 MPa).

Figura 4.6. Modelos Kriging de superficie continua RP promedio.



4.3.3. Relación IT, DaH y RP

La base de datos que se usó para construir el modelo de regresión lineal tuvo un total de 528 datos con información de las variables de interés agrupadas por tratamiento y perteneció al lote A. El análisis de varianza (tabla 4.13) indicó que el modelo tiene validez para ajustar los datos suministrados, alcanzando un coeficiente de determinación R^2 de 0.5; es decir el modelo de regresión a lo sumo explica la mitad de la variabilidad de IT a través de DaH y RP.

Tabla 4.13. Análisis de Varianza – Modelo de Regresión Lineal.

	Grados de libertad	Valor-P
Modelo	2	< 0.001
Residual	283	

*($\alpha = 0.05$).

Dentro del modelo de regresión lineal, los estadísticos sugieren (tabla 4.14) que los cambios en RP y DaH están asociados con cambios en IT; para las condiciones particulares del suelo sujeto de estudio en el momento de la operación de cosecha mecanizada con vagones auto volteo y las condiciones biofísicas de largo plazo generalmente estables donde se enmarcó el lote A.

Tabla 4.14. Estadísticos – Modelo de Regresión Lineal.

	Intervalo de Confianza				
	Coefficiente	Desviación Estándar	P-Valor	Límite Inferior	Límite Superior
Intercepto	-767.9	178.0	< 0.001	-1119.4	-416.6
RP	353.4	29.8	< 0.001	294.5	412.3
DaH	262.9	111.4	0.019	43.0	482.8

*P-Valor prueba de T - Student ($\alpha = 0.05$).

La base de datos que se usó para probar el modelo de regresión lineal (ecuación 4.1) tuvo un total de 54 datos con información de las variables de interés (dentro del dominio de la función) agrupadas por intensidades de tráfico (una entre calle sometida a 212.12 Mg.km/ha y una entre calle sometida a 345.45 Mg.km/ha). La RMSE del modelo para la base de datos de prueba fue de 124.7 Mg.km/ha; es decir, las predicciones se alejaron en promedio 124.7 Mg.km/ha del valor real de la base de datos de prueba, lo que corresponde aproximadamente a una IT de una maquina

cosechadora (peso de 184.42 kN) con características similares a los usados durante a cosecha mecanizada de caña de azúcar en el lote A y lote B. Usando los valores de RP y DaH críticos mencionados para el cultivo de caña de azúcar en la ecuación 4.1 se obtiene una IT de 483.66 Mg.km/ha, magnitud similar a la obtenida con IT1; es decir, la aproximación teórica sugirió que con el tránsito sucesivo de una cosechadora, un tractor y un vagón auto volteo (con las características de la maquinaria usada durante el experimento) sobre una misma superficie de suelo se logran valores de RP y DaH restrictivos para el cultivo de caña de azúcar.

$$IT=(353.4\pm 58.9)*RP+(262.9\pm 219.9)*DaH-(767.9\pm 351.5);$$

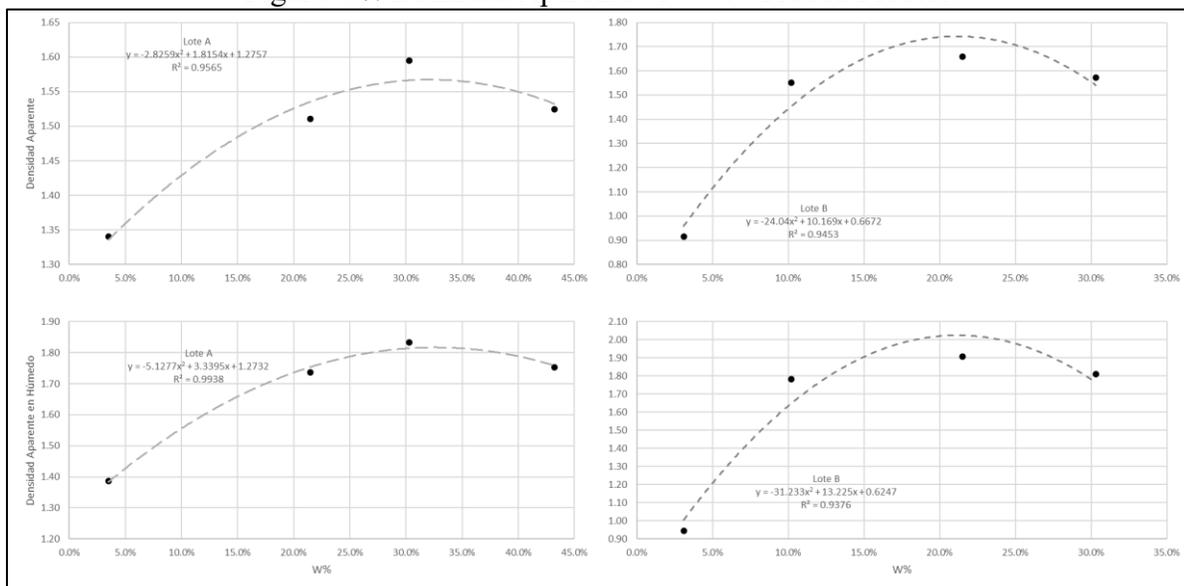
$$Dom[IT]=\{RP, DaH \mid 1.41 < RP < 2.46, 1.56 < DaH < 1.73\} \quad (4.1)$$

IT en unidades de Mg.km/ha, RP en MPa y DaH en Mg/m³.

4.3.4. Pruebas de compactación Proctor Estándar

Las curvas que relacionan la densidad aparente y densidad aparente en húmedo máximas para un W% determinado (figura 4.7), construidas a partir de las pruebas de Proctor, siguieron un modelo cuadrático con coeficientes de determinación del 95.65% para el lote A y del 94.53% para el lote B. La W_{crítica} para el lote A estuvo alrededor del 32% y para el lote B alrededor del 21%.

Figura 4.7. Densidad Aparente vs W% - Prueba Proctor.



4.4. Discusión

Las intensidades de tráfico (tabla 4.2) fueron similares a lo reportado por Rodríguez y Valencia (2012) referidos a la intensidad de tráfico en cosecha mecanizada con vagones auto volteo.

El suelo de lote A en términos generales se pudo clasificar como franco debido a su distribución de tamaño de partículas (tabla 4.3); por su parte, el suelo del lote B se pudo clasificar como arcilloso debido a su distribución de tamaño de partículas (tabla 8) (Hillel, 2013).

Los contenidos de humedad del suelo en los lotes A y B (tabla 4.3 y tabla 4.8) reflejaron que el suelo no estuvo en condiciones apropiadas de humedad para transitar con maquinaria agrícola. Y, aunque los contenidos de humedad no estuvieron alrededor de W_{crítica} (figura 4.7), las

condiciones de humedad durante las operaciones de cosecha mecánica pudieron contribuir al fenómeno de compactación, al reducir la fricción entre los separados y agregados del suelo, permitiendo que se compacte más fácilmente (Cueto *et al.*, 2009).

Las presiones que se ejercen en una prueba de Proctor Estándar son de alrededor de 240 kPa, similares a las presiones de inflado y contacto de la maquinaria usada para la operación de cosecha mecánica (Reyes R, 2010). Por lo que, la información de la figura 4.7 puede ser considerada como referencia para recomendar el momento oportuno para introducir maquinaria agrícola a los campos con suelos bajo condiciones biofísicas similares a las del presente estudio.

Todas las bases de datos cumplieron con los supuestos para ser sometida a pruebas de la estadística y la geoestadística (Armstrong, 1998; Diez *et al.*, 2019).

Los análisis de varianza de DaH para los lotes A y B (tabla 4.5 y 4.10) denotan una relación manifiesta entre la IT y DaH, y estuvo en consonancia a lo reportado por Draghi *et al.* (2015) en cuanto la densidad aparente estimada a los 10 cm de un suelo sometido a cinco pases de dos diferentes sistemas de siembra mecanizada (con labranza y siembra directa) incremento frente a un testigo (cero pasadas), pasando de 1.17 Mg/m³ a 1.25 Mg/m³ y 1.28 Mg/m³ respectivamente; aunque no lograron establecer diferencias significativas entre los valores encontrados.

Se conjeturó que la DaH no es un parámetro conveniente para el estudio de la compactación después de aplicar esfuerzos externos, ya que, únicamente señaló diferencias significativas cuando hubo cambios mayúsculos en los valores de DaH (Testigo, IT1 e IT3); esto debido a que el 75% del cambio en la densidad aparente es contribución del primer pase con maquina sobre el suelo y el 25% restante es contribución de los pases con maquina siguientes (Cueto *et al.*, 2009; Draghi *et al.*, 2015).

El comportamiento espacial de DaH para los lotes A y B (figura 4.3 y 4.5) reflejó el efecto de los tratamientos y soportó que DaH no es un parámetro conveniente para el estudio de la compactación en términos estadísticos y geoestadísticos; si bien, se expresan diferencias entre el Testigo, IT1 e IT3; no permite percibir cambios pequeños (colores similares en la escala entre las entre calles de la brecha y las contiguas) en la densidad del suelo por la aplicación de diferentes IT; lo anterior, con valores y comportamiento espacial similares a lo mostrado por Panziera *et al.* (2020) que no permiten evidenciar fácilmente las diferencias entre diferentes IT.

Los análisis de varianza de RP para los lotes A y B (tabla 4.5 y 4.10) denota una relación manifiesta entre la IT y RP, y estuvo en consonancia con García-Rodríguez *et al.* (2020) e Hidalgo *et al.* (2020) en lo que respecta a incrementos en la RP debido a diferentes IT, incrementos por encima de lo mostrado por un testigo.

Para el lote A, frente a IT1 e IT2 se encontró que la RP tuvo diferencias significativas con media superior en este último; IT3 no marco diferencia significativa con las demás IT; por otro lado, se percibió propensión al incremento de la RP en la medida que se incrementó la IT; resultados que guardan semejanza con lo reportado por Gutiérrez-Rodríguez *et al.* (2012) en que pasadas sobre el suelo de un cultivo con maquinaria agrícola de diferentes pesos incrementaron la RP en las capas superficiales y subsuperficiales, por ejemplo, entre los 15 a 30 cm de profundidad en un suelo, encontraron que la RP con un tractor pesado fue de 2.54 MPa y con un tractor liviano fue de 2.49 MPa.

Por profundidad, los datos de RP para el Lote A (tabla 4.7), mostraron diferencias significativas entre el Testigo y todas las IT, entre IT1 e T2 entre los 10 – 20 cm de profundidad; y entre, los dos primeros estratos (0 – 20 cm de profundidad) y los tres últimos (30 – 50 cm de profundidad) por tratamiento; con valores y comportamiento de RP similares a los expresados por Gutiérrez-Rodríguez *et al.* (2012) debido al tránsito de tractores pesados, medianos y livianos. Acerca de RP como parámetro para el estudio de la compactación debido a diferentes IT resulto

conveniente, porque al menos exhibió de forma clara diferencias significativas entre: IT1, IT2 e IT3 y el Testigo; IT1, IT2 e IT3 entre los 10 – 20 cm; y los estratos superficiales con los subsuperficiales.

Para el lote B, frente a IT1, IT2 e IT3 no se encontraron diferencias significativas; lo anterior pudo deberse a los valores de DaH (elevados desde un principio, sin evidenciar diferencias significativas entre tratamientos) bajo la condición de humedad particular que limitaron la compactación; es decir, se pudieron alcanzar los valores máximos de RP en los primeros momentos del tránsito de la maquinaria para operación de cosecha mecanizada; semejante a lo reportado por Quiroga *et al.* (2016) los cuales encontraron el máximo valor de densidad (aproximadamente 1.40 Mg/m^3) de un suelo agrícola en un rango de humedad entre 20% y 30%, y que este decrece en la medida que la proporción de las partículas de arena y limo aumentan.

Estratificando por profundidad los datos de RP para el lote B (tabla 4.12), se mostraron diferencias significativas entre el Testigo y todas las IT; y entre, los dos primeros estratos (0 – 20 cm de profundidad) y los tres últimos (30 – 50 cm de profundidad) por tratamiento; con valores y comportamiento de RP similares a los expresados por Gutiérrez-Rodríguez *et al.* (2012) debido al tránsito de tractores pesados, medianos y livianos. Acerca de RP como parámetro para el estudio de la compactación debido a diferentes IT se sostiene su conveniencia, porque al menos exhibió de forma clara diferencias significativas entre: IT1, IT2 e IT3 y el Testigo; y los estratos superficiales con los subsuperficiales.

La clasificación de la dependencia espacial de todos los modelos de superficie continua se realizó con base en lo expresado por Jaramillo (2012).

El comportamiento espacial de RP para los lotes A y B (figura 4.4 y 4.6) reflejó el efecto de los tratamientos, las diferencias significativas encontradas entre los dos momentos y soportando que la RP es un parámetro conveniente para el estudio de la compactación en términos estadísticos y geoestadísticos, porque permite percibir cambios pequeños (colores diferentes en la escala entre las entre calles de la brecha y las contiguas) en la resistencia mecánica a la penetración por la aplicación de diferentes IT; similar a lo expresado por Panziera *et al.* (2020) en que, se presentaron mejores condiciones en el suelo cuando el suelo se sometió a menores IT, advirtiéndose valores de RP menores en las entre calles contiguas a brecha.

Se entiende que la densidad cuando se estima con base en masa de suelo seco (Da) es diferente a la densidad en húmedo (DaH, esta última mayor), que su cálculo puede ser engorroso para la cantidad de muestras que se manejan cuando se habla de agricultura digital porque implica transportar masas de suelo a una instalación provista de horno para su secado y de un tiempo considerable para obtener los datos; y que los dos valores se pueden relacionar a través de la ecuación $Da=DaH/(1+\%W)$ (Davidson, 1965).

Para los valores promedios máximos encontrados de DaH en los lotes A y B (figura 4.7) después de la cosecha mecanizada, la Da fue de aproximadamente 1.50 Mg/m^3 en ambos casos; pudiendo ser un valor crítico para el crecimiento de las raíces de gran parte de los cultivos anuales sembrados en suelos francos y arcillosos según Suzuki *et al.* (2022). Por lo que, en aras de que la experiencia pueda ser puesta en práctica, se permitió trabajar con DaH como un parámetro análogo a Da, y así aportar al estudio de la compactación en suelos agrícolas; lo que requiere confianza en los métodos estocásticos y deterministas (Hillel, 2013).

Valores de densidad del suelo superiores a 1.45 Mg/m^3 y de resistencia mecánica a la penetración superiores a 2.50 MPa son restrictivos para el crecimiento de las raíces en cultivos de caña de azúcar (Panziera *et al.*, 2020); por tanto, todos los valores promedios encontrados de DaH y RP debido a IT1, IT2 e IT3 bajo las condiciones particulares de los suelos sujetos de estudio, podrían considerarse como restrictivos y muestran el efecto del tránsito de maquinaria pesada sobre

el fenómeno de la compactación; reconociendo la propensión al incremento de la RP en la medida que se incrementó la IT.

La DaH inicial influyó en la compactación de los suelos sujetos de estudio, en tanto que, cuando su magnitud fue mayor (1.67 Mg/m^3 Testigo lote B), la susceptibilidad a la compactación fue menor, encontrando un RP promedio máximo de 1.83 MPa; frente a lo ocurrido cuando su magnitud fue menor (1.56 Mg/m^3 Testigo lote A), la compactación fue mayor, encontrando un RP promedio máximo de 2.46 MPa; lo anterior en concordancia con Silva *et al.* (2018) y Masola (2020) cuando expresan que la susceptibilidad a la compactación del suelo decrece con el aumento de densidad del suelo.

Cuando se discrimino por estratos, se encontró que IT2 e IT3 favorecieron más la compactación al llevar la RP a valores cercanos y superiores a 2.00 MPa a partir de los 20 o 30 cm de profundidad; en contraste con IT1 que llevo la RP a esos valores a partir de los 30 o 40 cm de profundidad, lo anterior influenciado por la susceptibilidad a la compactación y en el mismo sentido de lo expresado por Rodríguez y Valencia (2012) en lo que respecta a la menor compactación que se causa por operaciones de cosecha mecanizada de caña de azúcar con IT bajas.

Se advirtió que la transferencia de carga debido al tránsito de maquinaria durante la cosecha mecanizada fue similar a la suma de las presiones de contacto de las áreas cubiertas con las llantas u orugas (1.01 MPa); teniendo incrementos en RP promedio (Testigo frente a IT1, IT2 e IT3) de alrededor de 1.03 MPa (lote A) cuando el suelo fue más susceptible a la compactación y de 0.42 MPa (lote B) cuando fue menos susceptible a la compactación; en conformidad con la teoría de la dinámica del suelo en relación con la maquinaria (Kuiper y van De Zande, 1994).

En cuanto a la distribución espacial de RP en la vertical: el suelo del lote A cuyas condiciones favorecieron la compactación (menor DaH Testigo frente a lote B), mostró una distribución cuasiparabólica, es decir, la propagación de la compactación (diferencia entre Testigo e IT1, IT2 e IT3) tendió a ser mayor en los estratos superficiales y menor en los subsuperficiales; y el suelo de lote B menos susceptible a la compactación (mayor DaH Testigo frente a lote A), exhibió una distribución uniforme, es decir, la propagación de la compactación fue igual en los estratos superficiales y subsuperficiales; dos tipos distribuciones que coinciden con lo reportado por Koolen y Kuipers, (1983), Keller *et al.* (2019) y Seehusen *et al.* (2019).

Por otro lado, la distribución espacial de DaH y RP en la horizontal, en los suelos del lote A y lote B reflejaron una continuidad, es decir, las diferentes IT experimentadas influyeron en la compactación de las áreas contiguas; razón por la cual fueron tacitas las diferencias de DaH y RP entre IT1, IT2 e IT3. La propagación de la compactación debido al tránsito de maquinaria con diferentes niveles de IT, alcanzo un valor mínimo de 4.55 m en el lote B cuando el suelo fue menos susceptible y un valor máximo de 18.77 m en el lote A cuando el suelo fue más susceptible; propagación que tuvo coincidencias con el modelamiento numérico de la compactación realizado por Silva., *et al.* (2018) a través del método de elementos finitos, que mostró una influencia horizontal de cuatro metros de las tensiones provocadas por el paso de un tractor sobre el suelo.

En último, la ecuación 4.1 más allá de ser usada para la estimación puntual de IT, RP o DaH (que es posible), se propone como una herramienta de gestión de la mecanización agrícola con la que se pueden construir a partir de un modelo simple (porque es una ecuación que involucra variables a la primera potencia, sumas y restas) escenarios de compactación en termino de DaH y RP causado por el tránsito de maquinaria y seleccionar el que arroje valores aceptables, reconociendo las condiciones particulares que se puedan presentar y realizando los ajustes necesarios a los coeficientes del modelo para tener mejores aproximaciones; ya que como expresaron Silva *et al.* (2018) "... la gestión del tráfico es una herramienta importante para controlar la compactación del suelo...".

Se recomienda rediseñar los campos de cultivo de caña de azúcar para que al momento de la cosecha mecánica no se deba hacer una brecha que origine diferentes intensidades de tráfico y provoque que porciones del suelo cosechado alcancen valores críticos de densidad del suelo y resistencia mecánica a la penetración debido a la propagación horizontal de la compactación. Lo anterior se puede extender a los campos de sistemas productivos agrícolas que puedan tener practicas similares.

Se recomienda en estudios futuros hacer ensayos que permitan profundizar sobre la distribución de la carga inducida por maquinaria sobre suelos agrícolas con diferentes susceptibilidades a la compactación.

4.5. Conclusiones

La compactación del suelo muestra relación con la intensidad del tráfico durante la cosecha mecánica y con la densidad del suelo; además se propaga en menor proporción sobre la dirección horizontal que sobre la dirección vertical, en la que alcanza las mayores magnitudes en los estratos subsuperficiales (> 30 cm de profundidad) con intensidades de tráfico iguales o superiores a los 612.12 Mg.km/ha. La propagación horizontal de la compactación aumenta (18.77 m) con menores valores de densidad aparente en húmedo (1.56 Mg/m³) y se revierte en el caso contrario (1.67 Mg/m³).

La transferencia de carga al suelo susceptible a la compactación fue similar en el total de las presiones de contacto ejercidas sobre el suelo por un tránsito simultáneo de las llantas y orugas de la maquinaria usada para la cosecha mecánica (1.01 MPa), y se redujo en un 58% cuando el suelo fue menos susceptible a la compactación.

La cosecha mecánica de caña de azúcar con intensidad de tráfico alta (iguales o superiores a los 612.12 Mg.km/ha) favoreció la compactación a partir de los niveles superficiales (< 30 cm de profundidad), llevando los valores de densidad del suelo y resistencia mecánica a la penetración a valores críticos. La cosecha mecánica de caña de azúcar con intensidad de tráfico baja (hasta 478.79 Mg.km/ha) logró valores críticos de densidad del suelo y resistencia mecánica a la penetración a partir de los niveles subsuperficiales (> 30 cm de profundidad).

El método empleado para el estudio de la compactación inducida fue adecuado para exponer el efecto de la intensidad de tráfico sobre la densidad aparente del suelo en húmedo, la resistencia mecánica a la penetración y su relación; aportando un modelo matemático que explicó hasta el 50% de la variabilidad del fenómeno de compactación inducida por el tránsito de maquinaria sobre el suelo.

4.6. Referencias

- Antille, D.L.; Peets, S., Galambošová, J.; Botta, G.F.; Rataj, V.; Macak, M.; Tullberg, J.N.; Chamen, W.C.T.; White, D.R.; Misiewicz, P.A.; Hargreaves, P.R.; Bienvenido, J.F. y Godwin, R.J. (2019). Soil compaction and controlled traffic farming in arable and grass cropping systems. *Agronomy Research*. 17(3): 653-682. <https://doi.org/10.15159/ar.19.133>
- Armstrong, M. (1998). *Basic Linear Geostatistics*. Editorial Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Estados Unidos. 154 p. <https://www.springer.com/gp/book/9783540618454>
- Carbonell-González, J.; Quintero-Durán, R.; Torres-Aguas, JS.; Osorio-Murillo, CA.; Isaacs-Echeverri, CH y Victoria-Kafure, J.I. (2011). Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca (cuarta aproximación): principios metodológicos y aplicaciones (Serie Técnica No. 38). Cenicaña, Colombia. 119p. https://www.cenicana.org/pdf_privado/serie_tecnica/st_38/st_38.pdf

- Cueto, O. G.; Coronel, C. E. I. y Suárez, M.H. (2009). Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(2): 57-63. <https://www.redalyc.org/pdf/932/93215937011.pdf>
- Davidson, D.T. (1965). Penetrometer measurements. En: C.A. Black 47. (ed.). *Methods of soil analysis, part I. Agronomy*. 9: 472-484. <https://doi.org/10.2134/agronmonogr9.1.c37>
- de-Moraes, M. T. D., Silva, V. R. D., Zwirtes, A. L., & Carlesso, R. (2014). Use of penetrometers in agriculture: a review. *Engenharia Agrícola*, 34, 179-193. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162014000100019>
- Diez, D., Barr, C. & Cetinkaya-Rundel, M. (2019). One-Sample Means with the T-Distribution. In: D. Diez, M. Cetinkaya-Rundel, y C. Barr (Eds), *OpenIntro Statistics Fourth Edition* (pp. 251-261). Estados Unidos: OpenIntro Ed. <https://www.openintro.org/os>
- Draghi, L., Jorajuria Collazo, D., Sarena, D., Bailleres, M., Melani, E., Castillo, J. M., ... & Palancar, T. (2015). Impacto del tránsito en dos sistemas de siembra. *Agrociencia*. 19(2): 59-67. <http://www.scielo.edu.u/pdf/agro/v19n2/v19n2a08.pdf>
- García-Rodríguez, E.; Gutiérrez-Rodríguez, F.; Ramírez Dávila, J. F.; González-Huerta, A.; Pérez López, D.D.J. y Serrato-Cuevas, R. (2020). Evaluación de la intensidad del tráfico de tractores e implementos en un suelo agrícola. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*. 11(4): 753-766. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i4.2133>
- Gill, W. y Vanderberg, G.E. (1967). *Soil dynamics in tillage and traction*. USDA, Agricultural Research Services, Washington, D.C. 511p. <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT10309639/PDF>
- Gutiérrez-Rodríguez, F.; González-Huerta, A.; Pérez-López, D.D.J.; Franco-Mora, O.; Morales-Rosales, E.J.; Saldívar-Iglesias, P. y Martínez-Rueda, C.G. (2012). Compactación inducida por el rodaje de tractores agrícolas en un Vertisol. *Terra Latinoamericana*. 30(1): 1-7. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-57792012000100001
- Hernández-Sánchez, J. M. de los D.; Figueroa-Sandoval, B. y Martínez Menes, M.R. (2019). Propiedades físicas del suelo y su relación con la plasticidad en un sistema bajo labranza tradicional y no labranza. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. (22): 53-61. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i22.1858>
- Hidalgo, R.J.; Pozzolo, O.R.; Domínguez, J.F.; Giménez, L. y Botta, G.F. (2020). Compactación del suelo causado por el tránsito de maquinarias en la cosecha de maíz (*Zea mays*). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. 52(1): 161-174. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1853-86652020000100013&script=sci_arttext&tlng=en
- Hillel, D. (2013). *Fundamentals of soil physics*. Academic press. Estados Unidos de América. 413 p. (Consultada 10 agosto 2022).
- Jaramillo, D.F. (2012). variabilidad espacial del suelo: Bases para su estudio. *Revista de la Facultad de Ciencias*. 1(1): 73-87. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rfc/article/view/49004>
- Keller, T.; Sandin, M.; Colombi, T.; Horn, R. y Or, D. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*. 194: 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- Koolen, A. y Kuipers, H. (1983). *Agricultural soil mechanics*. Springer Science & Business Media. 244 pp. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-69010-5>
- Kuipers, H. y van De Zande, J.C. (1994). Quantification of traffic systems in crop production. *Developments in Agricultural Engineering*. 11: 417-445. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88286-8.50026-X>

- Liu, Y.; Ma, X.; Shu, L.; Hancke, G.P. y Abu-Mahfouz, A.M. (2020). From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current status, enabling technologies, and research challenges. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(6): 4322-4334. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.3003910>
- Lucero-Vega, G.; Troyo-Diéguez, E.; Murillo-Amador, B.; Nieto-Garibay, A.; Ruíz-Espinoza, F.H.; Beltrán-Morañes, F.A. y Zamora-Salgado, S. (2017). Diseño de un sistema de riego subterráneo para abatir la evaporación en suelo desnudo comparado con dos métodos convencionales. *Agrociencia*. 51(5): 487-505. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-31952017000500487&script=sci_arttext
- Masola, M.J. (2020). Propagación lateral de la compactación por tránsito de la maquinaria agrícola: ¿afecta la calidad del suelo, el intercambio gaseoso y la productividad de los cultivos? (Tesis Doctoral). <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/handle/11185/5650>
- Matheron, G. (2019). En: Pawlowsky-Glahn V, Serra J (eds). Matheron's theory of regionalised variables. Oxford University Press, Oxford. 189 pp. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198835660.001.0001>
- Montiel-Torres, AM. y Blanco-Sepúlveda, R. (2001). Métodos de optimización de muestreo en los estudios de las propiedades físicas del suelo. *EDAFOLOGIA*. 8: 51-59. <https://www.secs.com.es/data/Revista%20edafo/Edafologa%208-1.pdf#page=57>
- Panziera, W.; de Lima, C.L.R.; Moura-Bueno, J.M.; Pauletto, E.A.; Silva, S.D.A.; Timm, L. C. y Stumpf, L. (2020). Spatial variability of soil physical attributes in sugarcane using different row spacings. *Australian Journal of Crop Science*. 14(9): 1399-1404. <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.09.p2394>
- Quiroga, A.R.; Oderiz, A.J.; Uhaldegaray, M.; Alvarez, C.; Scherger, E.D.; Fernández, R. y Frasier, I. (2017). Influencia del uso de suelos sobre indicadores físicos de compactación. *Semiárida*. 26(2). [http://dx.doi.org/10.19137/semiárida.2016\(02\).19-26](http://dx.doi.org/10.19137/semiárida.2016(02).19-26)
- Reyes R, W. J. (2010). Evaluación de la susceptibilidad a la compactación en cuatro series de suelo bajo uso agrícola en Venezuela. *Bioagro*, 22(1), 29-36. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612010000100004
- Rodríguez, L. y Valencia, J. (2012). Impacto del tráfico de equipos durante la cosecha de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 12(10): 1128-1136. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001000014>
- Seehusen, T.; Riggert, R.; Fleige, H.; Horn, R. y Riley, H. (2019). Soil compaction and stress propagation after different wheeling intensities on a silt soil in South-East Norway. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 69(4): 343-355. <https://doi.org/10.1080/09064710.2019.1576762>
- Shah, A.N.; Tanveer, M.; Shahzad, B.; Yang, G.; Fahad, S.; Ali, S.; Muhammad, A.B. Shabaz, A.T.; Hafeez, A. y Souliyanonh, B. (2017). Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview. *Environ Sci Pollut Res*. 24: 10056–10067. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8421-y>
- Silva, R. P.; Rolim, M.M.; Gomes, I.F.; Pedrosa, E.M.; Tavares, U.E. y Santos, A.N. (2018). Numerical modeling of soil compaction in a sugarcane crop using the finite element method. *Soil and Tillage Research*. 181: 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.03.019>
- Suzuki, L.E.A.S.; Reinert, D.J.; Alves, M.C. y Reichert, J.M. (2022). Critical Limits for Soybean and Black Bean Root Growth, Based on Macroporosity and Penetrability, for Soils with Distinct Texture and Management Systems. *Sustainability*. 14(5): 2958. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/5/2958>

Capítulo V

V. COSECHA MÉCANICA DE *Saccharum spp.* CON VAGONES AUTO VOLTEO: CARACTERIZACIÓN DE LOS ESFUERZOS DE COMPRESIÓN Y SU RELACIÓN CON LA COMPACTACIÓN INDUCIDA

Resumen

El estudio caracterizó los esfuerzos verticales transmitidos por las intensidades de tráfico ocasionadas durante la cosecha mecánica de *Saccharum spp.* (caña de azúcar) con vagones auto volteo y relacionó la compactación inducida con la intensidad de tráfico; esto en una porción de un suelo de textura arcillosa y una porción de un suelo con textura franca del municipio de Palmira en la región del Valle del Cauca, Colombia. Para lograrlo, se desarrolló un dispositivo electrónico capaz de medir los esfuerzos de compresión en el suelo. Se cuantificaron los esfuerzos de compresión transmitidos a las porciones de suelo, hasta una profundidad de 50 cm, y se relacionaron estos esfuerzos con los efectos de compactación a través de las propiedades de densidad aparente en húmedo y resistencia mecánica a la penetración. Los resultados revelaron que la llanta trasera del tractor fue la principal responsable de transmitir los esfuerzos de compresión de mayor magnitud a las porciones de suelo. A una profundidad de 15 cm, los valores de estos esfuerzos fueron de 120.42 kPa y 108.29 kPa, mientras que a 50 cm alcanzaron los 35.52 kPa y 29.46 kPa. Estos esfuerzos generados por la maquinaria provocaron un aumento en los valores de densidad aparente en húmedo y resistencia mecánica a la penetración por encima de los niveles críticos necesarios para el adecuado desarrollo de la caña de azúcar (1.45 Mg/m³ y 2.50 MPa). En conclusión, el tránsito intensivo de maquinaria agrícola sobre el suelo conlleva la inducción de esfuerzos de compresión verticales, los cuales pueden resultar en la compactación del suelo, un factor importante a considerar en la gestión de la cosecha de la caña de azúcar y la conservación de la calidad del suelo.

Palabras clave: Compactación de los suelos, presión de contacto, maquinaria agrícola.

5.1. Introducción

Cuando la maquinaria agrícola se desplaza sobre el suelo, ejerce una presión sobre la superficie de contacto de sus sistemas de rodamiento. Esta presión depende del peso y la presión de inflado o contacto de la maquinaria, y se distribuye de manera similar a una parábola. Los valores más altos se registran en la superficie del suelo y en el centro geométrico de la huella generada por los sistemas de rodamiento, ya sean llantas u orugas. A medida que se profundiza en el perfil del suelo y se aleja de los bordes de la huella, la magnitud de la presión disminuye (Koolen y Kuipers, 1983; Calderón y Yañez, 2019; Keller et al., 2019).

La compactación de los suelos agrícolas está estrechamente relacionada con la presión ejercida por la maquinaria agrícola sobre la masa de suelo. La magnitud de la compactación depende de factores como la textura, la estructura y la humedad del suelo al momento del tránsito de la maquinaria. La compactación puede tener consecuencias negativas en las producciones agrícolas, ya que reduce la porosidad del suelo, dificulta la infiltración de agua y aire, y limita el crecimiento y desarrollo de las plantas. Todo esto puede llevar a una disminución de los rendimientos y una pérdida de calidad en las cosechas.

La compactación del suelo es especialmente preocupante en sistemas de producción agrícola que utilizan maquinaria pesada y realizan múltiples pasadas sobre una misma unidad de suelo. Este es el caso de los sistemas de producción de *Saccharum spp.* (caña de azúcar) durante la cosecha, cuando se emplean equipos de gran tamaño y masa. La intensidad de tráfico (IT) en estos sistemas puede ser muy alta, lo que provoca un aumento de la resistencia a la penetración y la densidad del suelo, lo que a su vez puede limitar el crecimiento y desarrollo de las plantas de caña de azúcar (López-Bravo., et al., 2022).

En Colombia, la producción de caña de azúcar es una actividad agrícola intensiva que se concentra en el valle geográfico del río Cauca. Para las operaciones de cosecha mecánica de la caña, se utiliza una flota de maquinaria compuesta normalmente por una cosechadora, dos tractores y vagones de auto volteo para la carga y transporte del material cosechado. Durante la ejecución de la operación de cosecha, la maquinaria sigue un patrón de navegación que origina diferentes IT distribuidas espacialmente sobre la masa de suelo. Este patrón de navegación puede tener un impacto significativo en la compactación del suelo y, por lo tanto, en la calidad y productividad del cultivo.

Se reporta que la máxima IT durante una operación convencional de cosecha mecánica en el valle geográfico del río Cauca, Colombia; puede alcanzar valores de 745.45 Mg.km/ha; magnitudes que corresponden al tránsito sucesivo de la cosechadora (2 veces), el tractor (4 veces) y el vagón de auto volteo (4 veces) sobre una misma unidad de suelo; valores de IT que favorecen la compactación al incrementar la densidad y la resistencia mecánica a la penetración del suelo hasta una profundidad de 50 cm (Rodríguez y Valencia, 2012)

La producción de alimentos de manera sostenible en un mundo con recursos escasos y un clima cambiante representa un gran desafío. Las tecnologías de la información ofrecen una oportunidad para la agricultura de proporcionar soluciones innovadoras a estos desafíos complejos. Es esencial que las ciencias aplicadas a la agricultura respalden el diseño y uso de tecnologías digitales para lograr resultados beneficiosos en la producción agrícola, minimizar los impactos negativos en el medio ambiente y evitar consecuencias no deseadas como la compactación del suelo. Por lo tanto, la investigación y el desarrollo de tecnologías agrícolas bajo el concepto de la agricultura digital deben ser una prioridad para satisfacer la creciente demanda de alimentos y contribuir a la sostenibilidad de la agricultura (Shepherd et al., 2018).

El objetivo de la investigación fue caracterizar los esfuerzos verticales transmitidos por las intensidades de tráfico ocasionadas durante la cosecha mecánica de *Saccharum spp.* (caña de azúcar) con vagones auto volteo y relacionar la compactación inducida con la intensidad de tráfico, en una porción de un suelo de textura arcillosa y una porción de un suelo con textura franca del municipio de Palmira en la región del Valle del Cauca, Colombia

5.2. Materiales y métodos

5.2.1. Desarrollo del sensor de esfuerzo de compresión

En la construcción del sensor de esfuerzo de compresión, se utilizaron los siguientes componentes: una placa microcontroladora basada en el chip ATmega328P que recibe señales eléctricas y las convierte en señales analógicas, un módulo amplificador de señales eléctricas AD620, una pantalla LCD, un transductor de esfuerzos de compresión con capacidad nominal de 10 Mg y sensibilidad nominal de 2 ± 0.1 mV/V, que está protegido por un soporte antivuelco de acero inoxidable con una superficie de contacto de 160 cm². Además, se incluyó una batería de 12 V y una computadora en el proceso.

La programación de la placa microcontroladora para relacionar los datos análogos con esfuerzos de compresión, se realizó en el ecosistema de creación electrónica de código abierto Arduino, que se basa en el lenguaje de programación C++ y la calibración del sensor de esfuerzo de compresión se realizó con una máquina universal de ensayos (compresión) con capacidad de 100 kN, donde se sometió al sensor a esfuerzos que alcanzaron hasta aproximadamente los 1230.11 kPa. Los datos que arrojaron la máquina universal y el sensor de esfuerzos se sometieron a un análisis de varianza, una prueba de correlación de Pearson, y además se estimó el error estándar como indicador del grado de diferencia del valor medido por el sensor con respecto al parámetro considerado real (valor de la máquina universal de ensayos).

5.2.2. Área de estudio

El área de estudio se localizó en el departamento del Valle del Cauca, Colombia y comprendió dos porciones de suelo sembrados con caña de azúcar para producción orgánica con la variedad CC 05-430. En cada porción de suelo, se estableció una selección aleatoria sistemática de tres lugares de ensayo contiguos ubicados en el centro de tres entresurcos diferentes para ser sujetos de estudio, durante la operación de cosecha mecánica. Según las coordenadas geográficas WGS84 la primera porción de suelo (suelo A) se ubicó en 3°34'20.64" longitud N - 76°16'19.92" latitud O y la segunda porción (suelo B) en 3°35'54.24" longitud N - 76°18'55.08" latitud O.

El suelo A está ubicado en un área con propiedades biofísicas relativamente homogéneas, que se puede caracterizar por cobijar suelos de textura franca fina y franca fina sobre arcillosa y con contenido de arcilla menor del 35%; moderadamente bien drenados y bien drenados, moderadamente profundos y profundos; se encuentran ubicados en un relieve plano (pendientes de 0-1%) con permeabilidad alta, moderada y baja; dentro de una región con déficit de humedad y rendimientos promedios de 130 Mg de caña de azúcar por hectárea. El suelo B en un área con suelos de texturas finas y contenidos de arcilla entre 35 y 60%, moderadamente drenados y bien drenados, moderadamente profundos y bien profundos; con permeabilidades altas, moderadas y bajas; dentro de una región con humedades menores a 200 mm/año y rendimientos promedios de 142 Mg de caña de azúcar por hectárea (Carbonell-González *et al.*, 2011).

5.2.3. Cargas y presiones de inflado y contacto

En la operación de cosecha se usó: una máquina cosechadora con una presión estimada de contacto entre la oruga y el suelo de 156.9 kPa, un tractor con presiones de inflado de 103.4 kPa (llantas delanteras) y 158.6 kPa (llantas traseras) y un vagón auto volteo con presión de 296.5 kPa en sus llantas delanteras y traseras.

5.2.4. Muestreo y variables de interés

En las dos porciones de suelo seleccionado, para cada lugar de ensayo sujeto de estudio, las variables de interés fueron resistencia mecánica a la penetración promedio (RP) a 50 cm de profundidad, densidad aparente en húmedo (DaH) estimada hasta los 5 cm de profundidad y esfuerzos de compresión causados por el tránsito de la maquinaria estimados hasta los 50 cm de profundidad. La medición con el sensor de los esfuerzos de compresión causados, se realizaron de la siguiente forma: para cada porción de suelo se evaluaron los esfuerzos inducidos por el tránsito de la maquinaria a una velocidad de 1 km/h en el siguiente orden: primero máquina cosechadora e inmediatamente después el tractor con el vagón auto volteo, a tres profundidades (15, 30 y 50 cm), cada profundidad evaluada correspondió a un lugar de ensayo. Se recolectó información sobre las condiciones iniciales (Testigo) del suelo A y B en términos de RP y DaH y posteriormente cada

lugar de ensayo se sometió a tres IT diferentes; para cada IT se hizo muestreo de las variables RP y DaH en cada lugar de ensayo pertenecientes al suelo A y B. Lo anterior dando lugar a los tratamientos (cuadro 5.1) del experimento y configurando el diseño experimental como completamente al azar.

Para ubicar el sensor, se excavaron orificios en cada lugar de ensayo; los datos de DaH con los cilindros se tomaron directamente sobre la masa de suelo ubicada encima del sensor; y, los datos de RP se tomaron en las proximidades de la masa de suelo donde se ubicó el sensor.

Para propósitos de caracterización, en el suelo A y B se tomó una muestra dentro de las fronteras espaciales de los lotes antes de la operación de cosecha mecánica, para conocer en términos generales: los contenidos de humedad por unidad de masa de suelo (%W) siguiendo el método planteado por Lucero-Vega *et al.* (2017) y los límites de los estados de consistencia plástico y líquido siguiendo el método planteado por Hernández-Sánchez *et al.* (2019), y su distribución de tamaño de partículas siguiendo el método de Bouyoucos. Además, se realizó una medición de los esfuerzos de compresión causados directamente sobre el sensor, haciendo coincidir la superficie de contacto del soporte antivuelco que protege la celda de carga, con la superficie del suelo.

Tabla 5.1. Tratamientos del experimento.

Tratamientos	Descripción	IT (Mg.km/ha)
Testigo	Condiciones iniciales antes de cosecha mecanizada	0.00
IT1	Dos pasadas de cosechadora, tractor y vagón auto volteo	478.79
IT2	Dos pasadas de cosechadora y tres pasadas de tractor y vagón auto volteo	612.12
IT3	Dos pasadas de cosechadora y cuatro pasadas de tractor y vagón auto volteo	745.45

*Valores de IT corresponden a las planteadas en el capítulo IV.

Para la medición de RP se usó un sensor penetrómetro electrónico para mediciones in situ con las siguientes especificaciones técnicas: ángulo de cono de 60° y 1 cm² de superficie de cono (Davidson, 1965); para la estimación de la DaH se usó un cilindro de acero inoxidable con puntas afiladas con las siguientes dimensiones: diámetro de 5 cm, altura de 5 cm y volumen aproximado de 98.17 cm³

5.2.5. Análisis de la información

Las variables RP, DaH se sometieron a pruebas de la estadística descriptiva para el total de los datos y discriminados por tratamiento, la variable RP se sometió a prueba Shapiro-Wilk de distribución normal ($\alpha = 0.05$) para el total de los datos y análisis de varianza para determinar la significatividad estadística ($\alpha = 0.05$) de las diferencias observadas entre los tratamientos. Cuando existieron diferencias significativas, se utilizó la prueba Post Hoc de Diferencia Honesta Significativa de Tukey ($\alpha = 0.05$) para perfilar cual o cuales tratamientos fueron diferentes entre sí.

Los datos de esfuerzos de compresión causados se graficaron en relación con el tiempo, durante el tráfico sobre los lugares de ensayo, para cada una de las profundidades evaluadas; se estimaron los esfuerzos máximos causados para cada profundidad y se relacionaron con los esfuerzos causados directamente sobre el sensor a través del indicador “%amortiguación” que

matemáticamente se expresa según la ecuación 5.1, donde i hace referencia a la profundidad evaluada.

$$\% \text{amortiguación} = \left(1 - \frac{\text{esfuerzo causado}_i}{\text{esfuerzo causado sobre la superficie}} \right) * 100 \quad (5.1)$$

Las pruebas de la estadística descriptiva y normalidad, los análisis estadísticos para determinar diferencias significativas entre los tratamientos y los métodos para correlacionar los datos del sensor y la maquina universal de ensayos, se programaron con los módulos especializados del ecosistema Python (Python 3.9.5): pandas v1.2.4, SciPy v1.20.3, NumPy v1.20.0, statsmodels v0.12.2 y scikit-learn v1.1.1.

5.3.Resultados

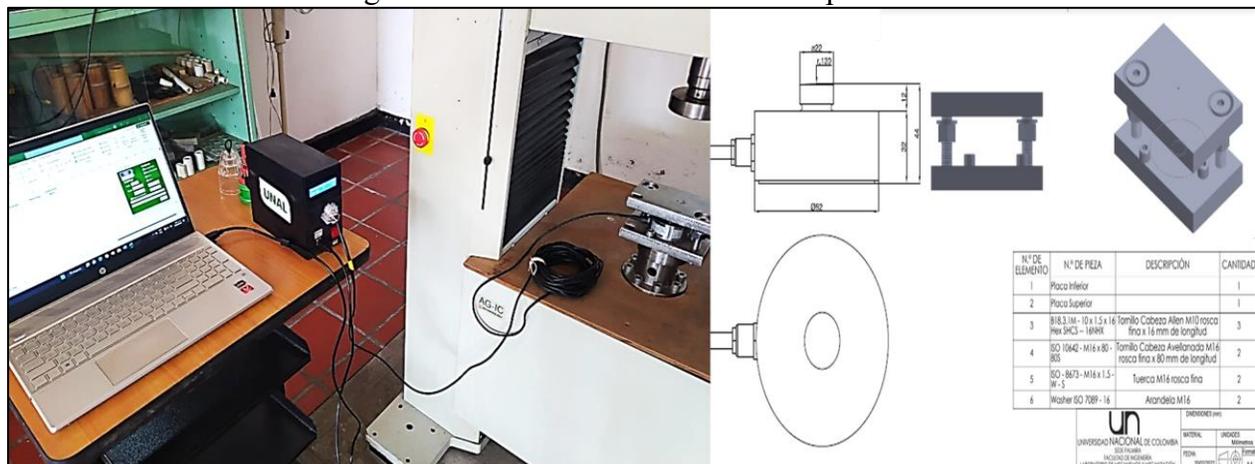
5.3.1. Desarrollo del sensor de esfuerzo de compresión

La combinación de los elementos eléctricos, electrónicos y la programación del microcontrolador dieron lugar a un sensor de esfuerzo de compresión (figura 5.1), con una capacidad máxima de 6 131.25 kPa (equivalente a una señal eléctrica de 5 V y una señal análoga de 1 023) y una sensibilidad de 5.13 kPa (equivalente a una señal eléctrica de 4.88 mV y una señal análoga de 1), capaz de mostrar los información capturada a razón de un segundo por dato en una pantalla LCD y transmitir la información a una computadora para su almacenamiento. El coeficiente de correlación de Pearson arrojó un valor de 0.99, que indica una cuasi correlación positiva perfecta entre los datos registrados por el sensor durante la calibración con la maquina universal de ensayos. El error estándar de los datos del sensor con respecto a los datos de la maquina universal de ensayos durante la calibración fue de 10.31 kPa.

5.3.2. Base de datos – Variables de interés

Para cada porción de suelo (suelo A y B), se recolecto un total de 12 datos para la propiedad DaH, 4 datos por lugar de ensayo, 1 dato por tratamientos; 60 datos para la propiedad RP, 20 datos por lugar de ensayo, 5 datos por tratamiento; para los esfuerzos causados se recolecto un total de 69 datos, 23 por lugar de ensayo, 11 datos para IT1, 6 datos para IT2 y 6 datos para IT3; para un total de 138 datos por porción de suelo y 276 datos para la totalidad del experimento.

Figura 5.1. Sensor de esfuerzo de compresión



*unidades en mm.

5.3.3. Análisis de la información

5.3.3.1. Condiciones iniciales y estadística descriptiva

Las condiciones iniciales de las propiedades DaH y RP para el suelo A son de 1.43 Mg/m³ y 1.54 MPa, respectivamente; y para el suelo B son de 1.36 Mg/m³ y 1.39 Mpa. Al momento de la experimentación %W en el suelo A fue de 25.81% y en el suelo B fue de 19.96%. La distribución de partículas en el suelo A fue: arcilla 21.6%, limo 46.0% y arena 32.4%; y en el suelo B fue: arcilla 48%, limo 26 % y arena 26%. Los límites plásticos y líquidos en el suelo A en términos %W, fueron: 25-y 41%, respectivamente; y en el suelo B fueron: 16.5 y 39.8%, respectivamente. La estadística descriptiva de las bases de datos se presenta en el cuadro 5.2.

Tabla 5.2. Estadística descriptiva bases de datos – Suelo A y B.

	Suelo A		Suelo B	
	DaH (Mg/m ³)	RP (MPa)	DaH (Mg/m ³)	RP (MPa)
Media	1.57	2.06	1.56	2.48
Mediana	1.57	2.11	1.58	2.48
Moda	1.43	0.87	1.37	1.62
Desviación estándar	0.12	0.65	0.13	1.07
Simetría	0.05	-0.23	-0.62	0.76
Normalidad P-Valor	NA	0.55	NA	0.01
Mínimo	1.42	0.66	1.36	0.83
Máximo	1.73	3.41	1.71	5.44

*NA: No aplica.

5.3.3.2. Análisis de varianza – resistencia mecánica a la penetración

Se pudo decir para la variable RP, por la cantidad de datos, que la media de la distribución de la muestra tiende a ser normal y simétrica; por lo que las bases de datos cumplieron con los supuestos para ser sometida a pruebas de la estadística (Diez *et al.*, 2019).

Los análisis de varianza para la variable RP en los suelos A y B (cuadro 5.3) evidenciaron que existieron diferencias significativas entre los tratamientos evaluados durante la cosecha mecánica de caña de azúcar. Las diferencias estadísticas (cuadro 5.3) se manifestaron entre el testigo y las diferentes IT.

Pesé a la ausencia generalizada de diferencias estadísticas en términos de las magnitudes de RP entre los tratamientos IT1, IT2 e IT3 para cada uno de los suelos, se notó una tendencia al aumento de su magnitud en la medida que se incrementó la IT (cuadro 5.3); siendo menor en IT1, intermedio en IT2 y mayor en IT3. Frente al caso particular del suelo A, en relación con testigo, IT1, IT2 e IT3; las diferencias entre las condiciones iniciales y posteriores, según los resultados, se debieron a la contribución de los tratamientos, esto, por la similitud entre sus desviaciones estándar. Para el suelo B, en dichas diferencias, según los resultados, además de la contribución de los tratamientos también hubo una mayor presencia de la variabilidad aleatoria, esto, por lo diverso de la desviación estándar del testigo frente a IT1, IT2 e IT3.

Tabla 5.3. Diferencias entre tratamientos: variable RP – Suelo A y B.

Suelo A					
Estadísticos	Testigo	IT1	IT2	IT3	Valor P
Media (MPa)	1.54a	2.01a	2.09b	2.14b	<0.001
Desviación estándar (MPa)	0.69	0.67	0.65	0.64	
Suelo B					
Estadísticos	Testigo	IT1	IT2	IT3	Valor P
Media (MPa)	1.39a	2.57b	2.77b	3.20b	<0.001
Desviación estándar (MPa)	0.34	0.85	0.83	1.17	

*Media en fila con letras minúsculas diferentes indican diferencias significativas según prueba de Tukey ($\alpha = 0.05$).

5.3.3.3. Caracterización de los esfuerzos de compresión inducidos por la maquinaria

El comportamiento temporal de los esfuerzos de compresión inducidos por el tránsito de la cosechadora, el tractor y el vagón auto volteo (figura 5.2), sobre los lugares de ensayo de los suelos A y B, en las profundidades y tratamientos evaluados, se pueden observar en la figura 5.3.

Los máximos esfuerzos registrados (cuadro 5.4) en el suelo A, fueron inducidos por el tratamiento IT3; y en el suelo B, fueron inducidos por el tratamiento IT1. En términos porcentuales, el efecto amortiguador de la masa de suelo se puede observar en el cuadro 5.4, tanto su media como discriminado por profundidades evaluadas.

Tabla 5.4. Esfuerzos máximos inducidos durante la operación de cosecha mecánica.

Profundidad	Cosechadora		Tractor		Vagón auto volteo	
	Suelo A IT3 (kPa)	Suelo B IT1 (kPa)	Suelo A IT3 (kPa)	Suelo B IT 1 (kPa)	Suelo A IT3 (kPa)	Suelo B IT1 (kPa)
Superficie	163.09		266.10		187.00	
15 cm	29.46	53.72	120.42	108.29	53.72	53.72
30 cm	17.33	41.58	84.03	77.97	53.72	47.65
50 cm	11.27	11.27	35.52	29.46	41.59	29.46
%Amortiguación						
Profundidad	Cosechadora		Tractor		Vagón auto volteo	
	Suelo A IT3	Suelo B IT1	Suelo A IT3	Suelo B IT1	Suelo A IT3	Suelo B IT1
15 cm	81.94%	67.06%	54.75%	59.30%	71.27%	71.27%
30 cm	89.37%	74.50%	68.42%	70.70%	71.27%	74.51%
50 cm	93.09%	93.09%	86.65%	88.92%	77.76%	88.92%
Media	88.13%	78.22%	69.94%	72.97%	73.43%	78.23%

*Los esfuerzos del tractor y vagón auto volteo corresponden a los generados por una de sus llantas traseras.

Figura 5.2. Cosechadora, tractor y vagón auto volteo.



5.4. Discusión

El suelo A en términos generales se clasificó como franco; por su parte, el suelo B se clasificó como arcilloso; lo anterior, debido a sus distribuciones de tamaños de partículas (Hillel, 2013). Los contenidos de humedad en los suelos A y B, al momento de las operaciones de cosecha estuvieron cercanos al límite plástico, lo que pudo mitigar el efecto de los esfuerzos inducidos sobre la compactación en los suelos estudiados, al posiblemente no lograr una deformación plástica sin recuperación elástica (Villagra-Mendoza *et al.*, 2023).

El análisis de varianza para la variable RP (cuadro 5.3), evidenció diferencias significativas entre los tratamientos para los dos suelos sujetos de estudio. Para el suelo A, las diferencias se expresaron entre testigo e IT1 con IT2 e IT3; para el suelo B, las diferencias significativas se expresaron entre testigo con IT1, IT2 e IT3. En términos globales, la experimentación señaló diferencias significativas entre los tratamientos y el testigo, pero no señaló diferencias entre los tratamientos; esto, acorde a lo concluido por López Báez *et al.* (2018) en cuanto la compactación tanto en la superficie como en el subsuelo es originada principalmente por el laboreo intensivo de los suelos. Por otro lado, se observa (cuadro 5.3) que los valores de RP incrementan en la medida que las intensidades de tráfico son mayores, de la misma forma que Rodríguez y Valencia (2012) advierten, en cuanto la menor compactación se causa por IT bajas.

Las magnitudes de los valores de DaH en ambos suelos son similares en sus estadísticos. Bien se puede decir que, la propiedad densidad aparente en los suelos, evaluada de la forma convencional no captura una porción significativa que permita un adecuado estudio de la compactación (Cueto *et al.*, 2009; Draghi *et al.*, 2015). En este sentido, para este estudio, no se percibió que la DaH influenciara la susceptibilidad a la compactación. Además, se advirtió que los suelos ya estaban en proceso de compactación con valores de densidad aparente cercanos a los 1.45 Mg/m^3 (Panziera *et al.*, 2020).

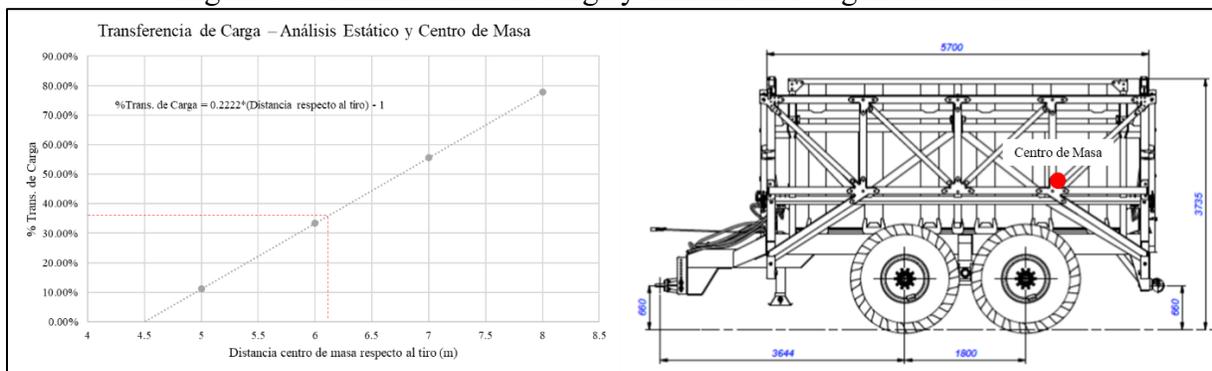
Valores de resistencia mecánica a la penetración superiores a 2.50 MPa son restrictivos para el crecimiento de las raíces en cultivos de caña de azúcar (Panziera., *et al.*, 2020). En el suelo A, para cada IT, no se alcanzaron esas magnitudes, siendo el mayor valor de RP igual a 2.14 MPa; en el suelo B, se superaron esas magnitudes desde IT1, pasando por IT2 hasta llegar a IT3, siendo el mayor valor de RP igual a 3.20 MPa, valor correspondiente a IT3 (cuadro 5.3). Este comportamiento coincide con lo planteado por Masola (2020), cuando menciona que la

susceptibilidad a la compactación aumenta con el contenido de arcilla. Por lo que, es necesario plantear estrategias de mecanización diferencial, de acuerdo con las condiciones del suelo: contenido de humedad y textura.

La susceptibilidad a la compactación pareció ser determinante en los esfuerzos inducidos al suelo por el tránsito de la maquinaria durante la operación de cosecha mecánica. Pese a que el comportamiento de los esfuerzos inducidos (figura 5.4) fue similar en los dos suelos estudiados; los momentos, en términos de IT, en los que se alcanzaron los esfuerzos inducidos máximos fueron diferentes. Para el suelo A, menos susceptible a la compactación, se requirió una mayor carga para generar compresión; contrario a lo ocurrido en el suelo B, que logró valores de compresión altos desde el primer momento que se sometió a cargas externas.

Los valores de esfuerzos inducidos por la maquinaria en la superficie (cuadro 5.4) medidos con el sensor, señalaron similitud con las presiones de contacto y de inflado; sin embargo, se logra percibir que existió una transferencia de carga del vagón auto volteo hacia el tractor. En cuanto el tractor se mueve y tira un implemento ocurre un cambio en la distribución de cargas sobre su sistema de rodamiento, a lo que se llama transferencia de carga; cuando el implemento se ubica en la parte posterior del tractor, la transferencia ocurre del implemento hacia el eje trasero del tractor (Alcock, 1986). Con ayuda del sensor, para este estudio, la transferencia de carga del vagón al tractor se estimó en un 36.26% y concordando con lo reportado por Gysi *et al.* (2001), en cuanto, los esfuerzos provocados por una llanta de tractor con presión de inflado de 180 kPa son 3.1 veces superiores en la superficie comparados con los esfuerzos inducidos a una profundidad de 30 cm en el suelo; para este estudio los valores comparativos fueron: suelo A con 3.17 veces y suelo B con 3.41 veces. De acuerdo con el análisis estático de fuerzas para el vagón auto volteo (figura 5.3) con respecto al punto de tiro, para lograr una transferencia de carga del 36.26% el centro de masa del vagón auto volteo y su contenido, debió ubicarse a una distancia aproximada de 6 m con respecto al tiro; es decir, ubicado aproximadamente 0.5 m atrás del eje trasero del vagón auto volteo; lo anterior, asumiendo reacciones iguales en las llantas debido a la presencia de un mecanismo articulado.

Figura 5.3. Transferencia de carga y dimensiones vagón auto volteo.



*Dimensiones de vagón auto volteo en mm, de acuerdo con el manual del fabricante.

La distribución espacial de los esfuerzos de compresión en la vertical en el suelo A y B (cuadro 5.4) que pudo ser caracterizada gracias al sensor de esfuerzos de compresión, enseñó una distribución cuasiparabólica, es decir, la propagación de la compactación tendió a ser mayor en los estratos superficiales y menor en los subsuperficiales; distribución que coinciden con lo reportado por Koolen y Kuipers, (1983), Keller *et al.* (2019) y Seehusen *et al.* (2019).

La media del indicador %amortiguación (cuadro 5.4), parece señalar que, el suelo soporta mejor los esfuerzos mecánicos inducidos de bajas magnitudes; al expresar valores más altos para la maquina cosechadora (88.13 y 78.22%) y el vagón auto volteo (73.43 y 78.23%), y valores más bajos para el tractor (69.94 y 72.97%).

Según Shahgholi y Abuali (2015) cuando existen esfuerzos externos el suelo se comprime y en usencia de ellos el suelo se expande; dependiendo este comportamiento de la cantidad de puntos de contacto entre los sólidos, íntimamente relacionado con su textura (Ellies Sch *et al.*, 2000). Lo mencionado y los resultados obtenidos de la distribución de los esfuerzos (cuadro 5.4 y figura 5.4), sugiere que, en los suelos menos susceptibles a la compactación por sus condiciones texturales, como el suelo A, la propagación de los esfuerzos de compresión es menor por la cantidad de puntos de contacto entre los sólidos (arcilla 21.6%, limo 46.0% y arena 32.4%), por ende, requiere de mayor IT ($745.45 \text{ Mg.km/ha}^1$) para alcanzar los máximos esfuerzos (cuadro 5.1 y cuadro 5.4); en comparación con los suelos más susceptibles a la compactación, como el suelo B, donde la propagación de los esfuerzos de compresión fue mayor posiblemente debido a una mayor cantidad de puntos de contacto entre los sólidos (arcilla 48%, limo 26 % y arena 26%), en consecuencia, con IT más bajas (478.79 Mg.km/ha) se alcanzaron los máximos esfuerzos (cuadro 5.1 y cuadro 5.4).

Se vislumbra, que el suelo más susceptible a la compactación tiene una capacidad superior de volver a sus condiciones mecánicas iniciales - resiliencia (cuando no llegan a ser irreversibles) frente a los suelos menos susceptibles; esto en cuanto, en el suelo B, la tendencia de los esfuerzos de compresión fue a disminuir en la medida que aumentaba la IT, y en el suelo A, la tendencia de los esfuerzos fue al aumento en la medida que la magnitud de IT crecía (figura 5.4). No obstante, esos resultados no son reflejo del fenómeno de compactación; si bien, el suelo A estuvo cerca de los límites establecidos para considerarlo compactado, el suelo B supero dichos límites con creces.

Aunque se discute que la cuestión planteada y se sabe que suelos con límites líquidos similares, pero con índices de plasticidad que crecen (suelo B con respecto al suelo A), presentan una mayor tenacidad (resistencia a ser suprimido) y resistencia en seco (Villalaz Crespo, 2004), es necesario llevar a cabo más estudios en torno a este fenómeno en los suelos de uso agrícola.

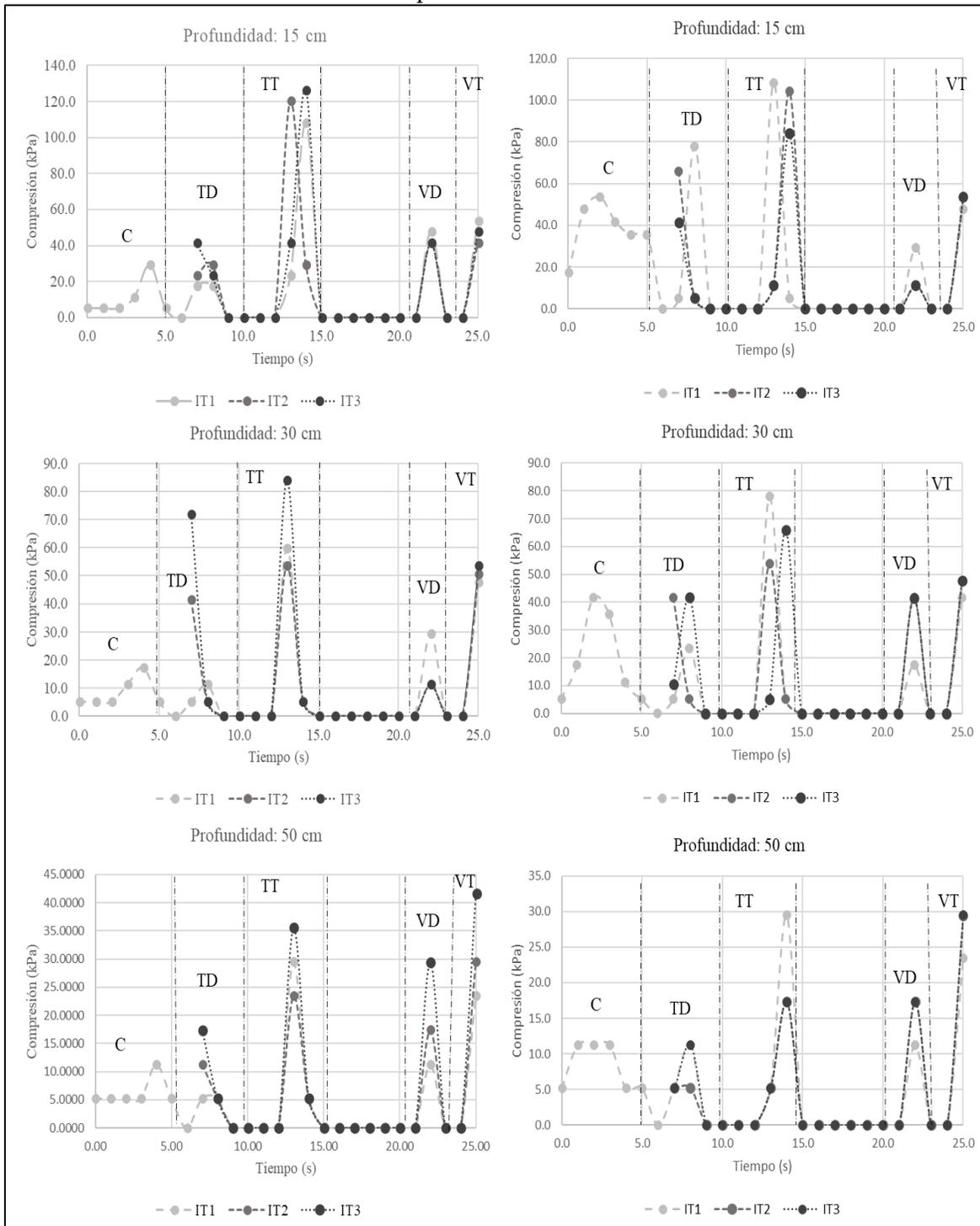
La aplicación de la tecnología, la programación y la electrónica para la captura, procesamiento y análisis de información proveniente de los procesos de mecanización agrícola, permite plantear discusiones alrededor de la relación suelo – máquina e iniciar el recorrido hacia nuevas estrategias de gestión del suelo y la maquinaria durante las operaciones en campo, que permitan atender los desafíos que enfrenta el sector de la producción de alimentos.

5.5. Conclusiones

En el suelo de textura arcillosa, se observó que las intensidades de tráfico provocaron compactación del suelo, lo que se reflejó en un incremento importante de la resistencia a la penetración frente a las condiciones iniciales. En el suelo de textura franca, se observó que las intensidades de tráfico no llegaron a provocar compactación del suelo, pese a que se evidenciaron incrementos en la resistencia a la penetración frente a las condiciones iniciales, estos fueron insuficientes.

Los esfuerzos máximos registrados por el sensor de esfuerzos de compresión durante el tránsito de la maquinaria en la operación de cosecha mecánica con vagones auto volteo en cada lugar de ensayo guardan relación con las presiones de contacto e inflado de las llantas del tractor, vagón auto volteo y cosechadora, en cuanto, a mayor presión de contacto e inflado mayor es la magnitud de la compresión vertical inducida.

Figura 5.4. Esfuerzos de compresión inducidos durante el tránsito de la maquinaria a tres profundidades.



*Las gráficas del margen derecho corresponden al suelo A y las del margen izquierdo al suelo B.

**C: oruga cosechadora; TD: llanta delantera del tractor; TT: llanta trasera del tractor; VD: llanta delantera del vagón y VT: llanta trasera del vagón.

5.6. Referencias

- Alcock, R. (1986). Tractor-implement systems. Avi Publishing Co. Estados Unidos, Connecticut, Westport. 162 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4684-6879-3>
- Calderón, N. G. y Yáñez, J. R. (2019). Degradación del suelo por compactación en función de la distribución del peso en los ejes de los tractores agrícolas. *Yulök Revista de Innovación Académica*, 3(2): 4-50.
- Carbonell-González, J.; Quintero-Durán, R.; Torres-Aguas, J.S.; Osorio-Murillo, C.A.; Isaacs-Echeverri, C.H.; Victoria-Kafure, J.I. (2011). Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca (cuarta aproximación): principios metodológicos y aplicaciones. Cali, Cenicaña. Serie Técnica No. 38. 119 p.
- Cueto, O. G.; Coronel, C. E. I. y Suárez, M.H. (2009). Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 18(2): 57-63.
- Davidson, D. T. (1965). Penetrometer measurements. *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Properties, Including Statistics of Measurement and Sampling*, 9: 472-484.
- Diez, D.; Barr, C. y Cetinkaya-Rundel, M. (2019). One-Sample Means with the T-Distribution. In: D. Diez, M. Cetinkaya-Rundel, y C. Barr (Eds), *OpenIntro Statistics Fourth Edition*. Estados Unidos: OpenIntro Ed. 251-261 p <https://www.openintro.org/book/os/>
- Draghi, L.; Jorajuria Collazo, D.; Sarena, D.; Bailleres, M.; Melani, E.; Castillo, J. M.; Cerisola, C. y Palancar, T. (2015). Impacto del tránsito en dos sistemas de siembra. *Agrociencia*. 19(2): 59-67.
- Ellies Sch, A.; Smith R, R.; Cuevas B, J.; Dörner F, J. y Pröschle T, A. (2000). Efecto de la humedad y frecuencia del tránsito sobre la distribución de tensiones de distintos suelos. *Agro Sur*, 28(2), 60–68. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2000.v28n2-08>
- Gysi, M.; Maeder, V.; & Weisskopf, P. (2001). Pressure distribution underneath tires of agricultural vehicles. *Transactions of the ASAE*, 44(6): 1385. <https://doi.org/10.13031/2013.7001>
- Hernández-Sánchez, J. M. D. L. D.; Figueroa-Sandoval, B. y Martínez Menes, M. R. (2019). Propiedades físicas del suelo y su relación con la plasticidad en un sistema bajo labranza tradicional y no labranza. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 10(SPE22), 53-61. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i22.1858>
- Hillel, D. (1980). *Fundamentals of soil physics*. Academic press. Estados Unidos de América, Nueva York. 413 p.
- Keller, T.; Sandín, M.; Colombi, T.; Horn, R. y Or, D. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194: 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- Koolen, A. y Kuipers, H. (1983). *Agricultural soil mechanics*. Springer Science & Business Media. Berlín, Alemania. 252 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-69010-5>
- López Báez, W.; Reynoso Santos, R.; López Martínez, J.; Camas Gómez, R. y Tasistro, A. (2018). Diagnóstico de la compactación en suelos cultivados con maíz en la Región Fraylesca, Chiapas. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 9(1): 65-79. <https://doi.org/10.29312/remexca.v9i1.848>
- López-Bravo, E.; Saucedo-Levi, E. R.; González-Cueto, O.; Herrera-Suárez, M. y Betancourt-Rodríguez, Y. (2022). Efectos de la cosecha mecanizada de la caña de azúcar sobre el suelo. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 31(1): 5-12.
- Lucero-Vega, G.; Troyo-Diéguez, E.; Murillo-Amador, B.; Nieto-Garibay, A.; Ruíz-Espinoza, F. H.; Beltrán-Morañes, F. A. y Zamora-Salgado, S. (2017). Diseño de un sistema de riego

- subterráneo para abatir la evaporación en suelo desnudo comparado con dos métodos convencionales. *Agrociencia*, 51(5): 487-505.
- Masola, M.J. (2020). Propagación lateral de la compactación por tránsito de la maquinaria agrícola: ¿afecta la calidad del suelo, el intercambio gaseoso y la productividad de los cultivos?. Tesis de doctorado. Universidad Nacional del Litoral. Esperanza, Santa Fe, Argentina.
- Panziera, W.; de Lima, C.L.R.; Moura-Bueno, J.M.; Pauletto, E.A.; Silva, S.D.A.; Timm, L. C. y Stumpf, L. (2020). Spatial variability of soil physical attributes in sugarcane using different row spacings. *Australian Journal of Crop Science*. 14(9): 1399-1404. <https://doi.org/10.21475/ajcs.20.14.09.p2394>
- Rodríguez, L. y Valencia, J. (2012). Impacto del tráfico de equipos durante la cosecha de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 12(10), 1128-1136. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012001000014>
- Seehusen, T.; Riggert, R.; Fleige, H.; Horn, R. y Riley, H. (2019). Soil compaction and stress propagation after different wheeling intensities on a silt soil in South-East Norway. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B—Soil & Plant Science*, 69(4): 343-355. <https://doi.org/10.1080/09064710.2019.1576762>
- Shahgholi, G. y Abuali, M. (2015). Measuring soil compaction and soil behavior under the tractor tire using strain transducer. *Journal of Terramechanics*, 59: 19-25. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2015.02.007>
- Shepherd, M.; Turner, J. A.; Small, B. y Wheeler, D. (2018). Priorities for science to overcome hurdles thwarting the full promise of the ‘digital agriculture’ revolution. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(14): 5083-5092. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9346>
- Villagra-Mendoza, K.; Brenes-Cano, D. y Gómez-Calderón, N. (2023). Efecto del balanceo de cargas en los ejes de tractores agrícolas sobre la eficiencia de labranza y las propiedades físico-mecánicas de un suelo vertisol. *Agronomía Costarricense*. 47(1): 101-121. <https://doi.org/10.15517/rac.v47i1.53968>
- Villalaz Crespo, C. (2004). Mecánica de suelos y cimentaciones (5ª ed.). Editorial Limusa. México, México D.F. 650 p.

Capítulo VI

VI. DISCUSIÓN GENERAL, CONCLUSIONES Y POSIBLES LINEAS DE INVESTIGACIÓN

La mayor porción de los suelos sembrados con *Saccharum spp* (caña de azúcar). en el Valle del Cauca, Colombia, son suelos pertenecientes a las zonas agroecológicas 11H0 (lote y suelo A) y 6H1 (lote y suelo B); con una ocupación total de 53,939 hectáreas (23.24%). Las zonas agroecológicas para el cultivo de caña de azúcar en Colombia son áreas geográficas específicas donde se reúnen condiciones favorables para el desarrollo y crecimiento de este cultivo. Estas zonas se determinan teniendo en cuenta factores como el clima, el suelo y la altitud, que son determinantes para el éxito de la producción de caña de azúcar.

Los suelos dentro de la zonificación 11H0, son de texturas finas con contenidos de arcilla menor al 35%, con condiciones adecuadas de drenaje y permeabilidad, ubicado en zonas planas bajo un régimen de humedad ústico. Por otro lado, los suelos dentro de la zonificación 6H1 son de texturas finas con contenidos de arcilla entre el 35% y 60%, con condiciones moderadas de drenaje y permeabilidad, ubicado en planos de terrazas bajo un régimen de humedad ústico (Carbonell-González., *et al.*, 2011).

El tránsito de maquinaria agrícola, como en la cosecha mecánica de caña de azúcar en Colombia, puede afectar las propiedades físicas del suelo. El peso y movimiento de las máquinas pueden provocar compresión del suelo, reduciendo su porosidad y capacidad de almacenar agua. Además, el tránsito constante puede llevar a la compactación del suelo, volviéndolo más denso y limitando el intercambio de gases y el crecimiento de las raíces. Estos impactos pueden alterar la estructura del suelo, dificultando la permeabilidad y la absorción de nutrientes por parte de las plantas. Para mitigar estos efectos, se pueden implementar prácticas adecuadas de manejo del suelo, como la reducción de la frecuencia y peso de la maquinaria. Y para esto, comprender cómo la intensidad del tráfico modifica las condiciones del suelo es esencial para implementar medidas adecuadas para el sistema de producción.

La investigación evidenció que la propagación de la compactación es tridimensional y está condicionada por el estado de las propiedades estructurales del suelo (densidad aparente, densidad aparente en húmedo, resistencia mecánica a la penetración) y la humedad al momento de someterlo a esfuerzos externos, ya que, la combinación de estas propiedades y condiciones en diferentes estados limitan la susceptibilidad a la compactación, de igual manera a lo expresado por Masola (2020); tal y como se mencionó en capítulo IV: la propagación horizontal de la compactación debido al tránsito de maquinaria con diferentes magnitudes de intensidad de tráfico, alcanzo un valor mínimo de 4.55 m y un valor máximo de 18.77 m e intensidades de tráfico con magnitudes de 612.12 y 745.45 Mg.km/ha incrementaron la RP a valores cercanos y superiores a 2.00 MPa a partir de los 20 o 30 cm de profundidad, en contraste, la intensidad de tráfico con magnitud de 478.79 Mg.km/ha incremento la RP a esos a esos valores partir a de los 30 o 40 cm de profundidad.

Además, la investigación demostró (capítulo V) que los esfuerzos generados durante la interacción entre la maquinaria y el suelo están estrechamente relacionados a las presiones de inflado y contacto de los neumáticos del tractor, el vagón auto volteo y la cosechadora. Los máximos esfuerzos de compresión ejercidos sobre el suelo en las diversas condiciones de tráfico y profundidades analizadas fueron ocasionados principalmente por el tránsito del tractor. Como lo expresaron Koolen & Kuipers (1983), Calderón y Yañez, (2019), Keller., *et al.* (2019) y Masola (2020), la presión ejercida al suelo por la maquinaria agrícola depende del peso de la máquina, la

distribución de la carga, la presión de inflado de los neumáticos y las condiciones del suelo. Estos factores influyen en la carga por unidad de área y en la distribución de la presión, lo cual puede impactar la compactación del suelo (Shahgholi., *et al.*, 2023). Y para el caso particular de la investigación el tractor fue la máquina de mayor peso en la operación de cosecha mecánica.

Para presiones de contacto iguales a 266.10 kPa (llanta trasera del tractor con vagón auto volteo), el esfuerzo inducido sobre la superficie fue 3.17 a 3.41 veces mayor al inducido a una profundidad de 30 cm, esto como se ha mencionado, fue condicionado por la susceptibilidad a la compactación del suelo. Estos resultados concuerdan con lo expresado por Gysi., *et al.* (2001), en cuanto, los esfuerzos provocados por una llanta de tractor con presión de inflado de 180 kPa son 3.1 veces superiores en la superficie comparados con los esfuerzos inducidos a una profundidad de 30 cm en el suelo.

En este sentido, también se evidencio en el capítulo IV y V que, la densidad y la presencia de agua el suelo son determinantes para su capacidad de amortiguación. Un suelo compacto y cohesivo tiende a tener una mayor resistencia a la compresión y puede soportar cargas sin deformarse considerablemente. Por otro lado, un suelo suelto y no cohesivo tenderá a comprimirse más fácilmente y ofrecerá una menor capacidad de amortiguación (Secco., *et al.*, 2023). En el particular, los suelos soportaron mejor los esfuerzos mecánicos inducidos de bajas magnitudes, como los ocasionados por la cosechadora y el vagón auto volteo.

Los hallazgos de la investigación brindaron una sólida base para decir de manera razonable que:

El tráfico durante las operaciones de cosecha mecanizada con vagones auto volteo en el sistema agroindustrial de la caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia influye en la magnitud y la distribución espacial de la compactación inducida estudiada en términos de: resistencia a la penetración y densidad aparente en húmedo.

Los resultados demuestran el tráfico cerca durante las operaciones de cosecha mecanizada con vagones auto volteo en el sistema agroindustrial de la caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia, ejerce una influencia significativa en la magnitud y la distribución espacial de la compactación inducida. Se establece una clara relación entre la intensidad de tráfico, medida en magnitudes de intensidad y presiones de contacto, con la resistencia a la penetración y la densidad aparente en húmedo del suelo. Además, se identifican los factores clave, como el peso de la maquinaria, la presión de inflado de los neumáticos y las condiciones del suelo, que contribuyen a la compactación del suelo. En conjunto, estos hallazgos respaldan y validan la hipótesis planteada, brindando una comprensión más completa de cómo la intensidad de tráfico afecta la compactación en el sistema agroindustrial de la caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia.

Se utilizó un modelo de regresión lineal para analizar la relación entre la intensidad de tráfico, la resistencia a la penetración y la densidad aparente en húmedo (capítulo IV). Los resultados indicaron que el modelo utilizado explica aproximadamente la mitad de la variabilidad observada en intensidad de tráfico a través de la interacción entre densidad aparente en húmedo y resistencia mecánica la penetración. Esto subraya la importancia de considerar tanto la densidad del suelo como su resistencia mecánica al evaluar los efectos de la intensidad de tráfico en la compactación del suelo.

Alcanzar los hallazgos de la investigación, también significo lograr aportes en términos metodológicos para el estudio de la compactación inducida. El primero, abordado en el capítulo III, fue el desarrollo de un sistema de información geográfico de libre acceso enfocado en la construcción de mapas de variabilidad espacial con una interfaz gráfica de usuario, que permite procesar y analizar datos espaciales en el ámbito de la agricultura digital.

El segundo, planteado en el capítulo IV, fue la modificación de las dimensiones de los cilindros rígidos usados para la estimación de la densidad aparente y densidad aparente en húmedo, con lo que se logró aumentar la sensibilidad en los análisis estadísticos y evidenciar diferencias significativas entre las condiciones iniciales y los tratamientos respecto a esta propiedad. Un avance frente al método convencional.

El tercero, tratado en el capítulo V, fue el desarrollo de un sensor para el estudio de la propagación vertical de los esfuerzos de compresión inducidos al suelo por el tránsito de maquinaria agrícola, usando tecnologías de la información libres, para facilitar la recolección de y la gestión de la información.

Lo logrado, se hizo bajo el entendido que, el uso de las tecnologías libres en la agricultura es de suma importancia debido a su capacidad para automatizar tareas, procesar grandes volúmenes de datos y mejorar la eficiencia en la gestión agrícola. Evidenciado, mediante el desarrollo de software (GeoStatLiteUN) y hardware (sensor de esfuerzos de compresión) especializados, que permiten la integración de sistemas de información geográfica y la implementación de técnicas avanzadas para potenciar la toma de decisiones basada en datos.

En conclusión, los resultados de esta investigación destacan la influencia significativa del tráfico durante las operaciones de cosecha mecanizada con vagones auto volteo en el sistema agroindustrial de la caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia, en la magnitud y distribución espacial de la compactación inducida. Se ha establecido una clara relación entre la intensidad de tráfico, medida en magnitudes de intensidad y presiones de contacto, con la resistencia a la penetración y la densidad aparente en húmedo del suelo. Además, se han identificado factores clave, como el peso de la maquinaria, la presión de inflado de los neumáticos y las condiciones del suelo, que contribuyen a la compactación del suelo. Estos hallazgos respaldan y validan la hipótesis planteada, proporcionando una comprensión más completa de cómo la intensidad de tráfico afecta la compactación en el sistema agroindustrial de la caña de azúcar en el Valle del Cauca, Colombia. Además, la investigación ha realizado aportes metodológicos, como el desarrollo de un sistema de información geográfico y la modificación de las dimensiones de los cilindros rígidos utilizados para la estimación de la densidad aparente y densidad aparente en húmedo, así como el desarrollo de un sensor para el estudio de la propagación vertical de los esfuerzos de compresión. Estos avances en conocimiento, tecnología y metodología pueden permitir una mejor comprensión y gestión de la compactación del suelo, lo que puede contribuir a una producción más eficiente y sostenible en el cultivo de caña de azúcar en la región del Valle del Cauca.

Aunque es cierto que, los resultados y tendencias discutidos en esta investigación son específicos para la zona del Valle del Cauca en Colombia y las características particulares de los suelos con mayor ocupación de cultivo de caña de azúcar en esa región, existen ciertos principios y factores generales que pueden aplicarse en otros contextos agrícolas.

Algunos conceptos generales pueden extrapolarse. Por ejemplo, el impacto de la maquinaria agrícola en la compactación del suelo está relacionado con factores como el peso de la maquinaria, la presión de inflado de los neumáticos y las condiciones del suelo. Estos factores son relevantes en cualquier contexto agrícola donde se utilicen maquinarias pesadas.

Los efectos de la compactación del suelo, como la reducción de la porosidad, la limitación del intercambio de gases y el crecimiento de las raíces, son fenómenos comunes que pueden ocurrir en diferentes tipos de suelos con magnitudes diferentes para la gran variedad de cultivos que puedan existir. La resistencia a la penetración y la densidad aparente son parámetros que se utilizan ampliamente para evaluar la compactación del suelo en diversos cultivos y ubicaciones.

Si bien, es necesario considerar las características específicas de cada suelo y su ubicación, es posible encontrar similitudes en el comportamiento de la compactación del suelo en diferentes

contextos agrícolas. Sin embargo, lo mejor siempre será realizar estudios específicos en cada región para comprender mejor las interacciones entre los factores locales, el suelo y las operaciones de mecanización en relación con la compactación. De esta manera, se podrán desarrollar las estrategias de manejo del suelo que contribuya a alcanzar el objetivo del concepto de la agricultura de precisión, teniendo en cuenta las condiciones específicas de cada área agrícola.

Desde esta perspectiva, a partir de la investigación plasmada en esta tesis, se podrían proponer las siguientes líneas y preguntas de investigación:

1. En el capítulo IV se planteó la ecuación 4.1 explica el 50% del fenómeno de compactación inducida; en términos de: IT, DaH y RP. En este sentido ¿Qué propiedad, parámetro o factor ayudaría a incrementar la proporción de la variabilidad total de la variable dependiente que es explicada por las variables independientes, de involucrase en el modelo matemático?
2. ¿Cómo se pueden cuantificar los costos y beneficios de las medidas de mitigación de la compactación del suelo en los sistemas de producción agrícola?
3. Identificar las intensidades de tráfico óptimas para la gestión del recurso suelo bajo un enfoque costo-beneficio en las diferentes operaciones de mecanización agrícola (labranza, siembra, mantenimiento del cultivo y cosecha).
4. Desarrollar estrategias que permitan implementar las intensidades de tráfico óptimas dentro de las producciones agrícolas: Selección de máquinas y planificación espacial de los cultivos.
5. ¿Cuál es el impacto a corto y largo plazo de la compactación del suelo en la productividad de los cultivos? Ejemplo, caña de azúcar.

Estas líneas y preguntas de investigación proporcionan puntos de partida para futuras investigaciones que podrían ampliar nuestro conocimiento sobre el tema y generar enfoques más efectivos y sostenibles para el manejo del suelo en la producción agrícola. Al considerar los impactos ambientales y su valor económico, se puede tomar decisiones más informadas que equilibren tanto los aspectos económicos como los ambientales para lograr una sostenibilidad integral.

6.1. Referencias

- Calderón, N. G., y Yáñez, J. R. (2019). Degradación del suelo por compactación en función de la distribución del peso en los ejes de los tractores agrícolas. *Yulök Revista de Innovación Académica*, 3(2), 44-50.
- Carbonell-González, J., Quintero-Durán, R., Torres-Aguas, JS., Osorio-Murillo, CA., Isaacs-Echeverri, CH., Victoria-Kafure, JI. (2011). Zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca (cuarta aproximación): principios metodológicos y aplicaciones. Cali, Cenicaña. 119p. (Serie Técnica No. 38).
- Gysi, M., Maeder, V., & Weisskopf, P. (2001). Pressure distribution underneath tires of agricultural vehicles. *Transactions of the ASAE*, 44(6), 1385. <https://doi.org/10.13031/2013.7001>
- Keller, T., Sandin, M., Colombi, T., Horn, R., y Or, D. (2019). Historical increase in agricultural machinery weights enhanced soil stress levels and adversely affected soil functioning. *Soil and Tillage Research*, 194, 104293. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104293>
- Koolen, A., y Kuipers, H. (1983). *Agricultural soil mechanics*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-69010-5>

- Masola, M.J. (2020). Propagación lateral de la compactación por tránsito de la maquinaria agrícola: ¿afecta la calidad del suelo, el intercambio gaseoso y la productividad de los cultivos?. Tesis de doctorado. Universidad Nacional del Litoral. Esperanza, Santa Fe, Argentina.
- Secco, D., Reinert, D. J., Reichert, J. M., De Marins, A. C., y Bassegio, D. (2023). Compressibility Parameters Associated to State of Soil Compaction and Moisture of Two Oxisols. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 54(4), 453-462. <https://doi.org/10.1080/00103624.2022.2118290>
- Shahgholi, G., Moinfar, A., Khoramifar, A., Maciej, S., y Szymanek, M. (2023). Investigating the Effect of Tractor's Tire Parameters on Soil Compaction Using Statistical and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) Methods. *Agriculture*, 13(2), 259. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/agriculture13020259>

ARTÍCULOS CIENTÍFICOS PUBLICADOS DERIVADOS DE ESTA TESIS

Saavedra-Rincón, S., y Chaparro-Anaya, Ó. (2022). Desarrollo de una aplicación en Python para mapeo de variabilidad espacial en la agricultura digital. *RevAIA*, 26(1), 7-27.

Saavedra-Rincón, S., y Chaparro-Anaya, Ó. (2022). Compactación inducida durante cosecha mecánica de *Saccharum spp.* y su relación con propiedades estructurales del suelo. *RevAIA*, 26(1), 155-176.

Saavedrar-Rincon, S., y Chaparro-Anaya, Ó. (2023). Compresión vertical inducida al suelo durante la cosecha mecánica de *Saccharum spp.* en el Valle del Cauca, Colombia. *RevAIA*, 27(1), 105-118.