UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Diagnóstico de la compactación de suelos arroceros del municipio de Campoalegre-Huila

Johnny Mauricio Gutiérrez Marroquín

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias

Área Curricular de Ciencias Naturales

Medellín, Colombia

2018

Diagnóstico de la compactación de suelos arroceros del municipio de Campoalegre-Huila

Johnny Mauricio Gutiérrez Marroquín

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Geomorfología y Suelos

Director:

Ph.D. Ramiro Ramírez Pisco

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ciencias, Área Curricular de Ciencias Naturales

Medellín, Colombia

2018

Agradecimiento especial a Dios, a mi esposa,

mi familia y amigos

Agradecimientos

Al Profesor Ramiro Ramírez por su dirección y guía en el presente trabajo

Al personal de Laboratorio de Física de Suelos por su colaboración en la realización de las pruebas

A la Fundación Desarrollo de las Ingenierías y Ciencias de la Salud por su colaboración y logística

A la Universidad Nacional de Colombia por brindarme las condiciones favorables para el desarrollo de este trabajo.

Resumen

Los estudios y reportes de cambios en la porosidad, resistencia a la penetración y compactación del suelo, en áreas productoras de arroz en Colombia son muy escasos. Por este motivo se recopiló información sobre la compactación de los suelos, los factores que inducen a este proceso estudiando la forma en que influye en otras propiedades edáficas, afectando el crecimiento y la producción de las plantas. Se evaluó las maneras de medir este parámetro y las técnicas para prevenir y corregir esta forma de degradación del suelo. Se estudió la conductividad hidráulica (K), la resistencia a la penetración (RP), la densidad aparente (Da), la Densidad real (Dr) y la Porosidad (%P) en 101 muestras recolectadas de 0 a 20 cm de profundidad en los suelos cultivados en arroz del municipio de Campoalegre-Huila, se elaboraron mapas de variabilidad espacial por medio de geo estadística para cada propiedad, encontrando sobre el área de estudio valores de resistencia a la penetración del suelo por debajo de 2 MPa, un valor medio de conductividad hidráulica de 37.01 $mm.h^{-1}$ y suelos moderadamente porosos a porosos, indicando que en los suelos de esta zona a la profundidad evaluada aún no se evidencian limitantes por compactación.

Palabras clave: Compactación, suelo, variabilidad

Abstract

Studies and reports of changes in porosity, resistance to penetration and soil compaction in rice producing areas in Colombia are very scarce. For this reason, information was collected on the compaction of soils, the factors that induce this process by studying the way in which it influences other edaphic properties, affecting the growth and production of the plants. The ways to measure this parameter and the techniques to prevent and correct this form of soil degradation were studied. The hydraulic conductivity (K), the penetration resistance (RP), the apparent density (Da), the real Density (Dr) and the Porosity (% P) in 101 samples collected from 0 to 20 cm deep were studied in the soils cultivated in rice of the municipality of Campoalegre-Huila, maps of spatial variability were elaborated by means of geo statistics for each property, finding on the study area values of resistance to the penetration of the soil below 2 MPa, a medium value of hydraulic conductivity of 37.01 mm.h-1 and moderately porous to porous soils, indicating that in the soils of this zone at the evaluated depth, there are still no limitations due to compaction.

Keywords: Compaction, soil, variability

Contenido

Pág.

LISTA DE FIGURAS 8
LISTA DE TABLAS 9
LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS 10
INTRODUCCIÓN 13
OBJETIVOS 13
1. MARCO CONCEPTUAL 14
1.1 ¿Qué es compactación? 14
1.2 Relación de la compactación con otras propiedades del suelo 16
1.2.1 Densidad Aparente 16
1.2.2 Resistencia a la penetración del suelo 17
1.2.3 Conductividad Hidráulica 18
1.3 Métodos para estimar la compactación del suelo 20
1.4 Factores que causan compactación en el suelo 21
1.5 ¿Cómo reducir la compactación del suelo? 22
1.6 Estudios de compactación alrededor del mundo 25
2. METODOLOGÍA 29
2.1 Ubicación del área de estudio 29
2.2 Mediciones de campo y toma de muestras de suelo 31
2.2.1 Densidad aparente 24
2.2.2 Densidad Real 25
2.2.3 Resistencia a la penetración 25
2.2.4 Conductividad Hidráulica 26
2.2.5 Humedad 27
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN 28
3.1 Densidad aparente 28
3.2 Densidad real 30
3.3 Porosidad 31
3.4 Resistencia a la penetración 33
3.5 Conductividad hidráulica 34
3.6 Humedad 35
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 36
4.1 Conclusiones 36
4.2 Recomendaciones 36
4.3 Anexo: Resultados de las variables medidas en campo y laboratorio. 38
BIBLIOGRAFÍA 41

Lista de figuras

Pág.
Figura 1. Ubicación espacial del área de estudio..... 19
Figura 2.Cultivo de arroz en la vereda, Vega de oriente, Municipio de Campoalegre-Huila. 20
Figura 3. Puntos de muestreo de suelo sobre el área de estudio, Municipio de Campoalegre-Huila. 21
Figura 4. Toma de muestras para densidad aparente del suelo. Imagen propia..... 24
Figura 5. Muestra de suelo en cilindro, para análisis de la densidad aparente 24
Figura 6. Medición de la densidad real en el pentapicnómetro 25
Figura 7. Medición de la resistencia a la penetración 25
Figura 8. Muestras para conductividad hidráulica de suelo..... 26
Figura 9. Determinación de la humedad del suelo..... 27
Figura 10. Dispersión de la densidad aparente, caja y bigotes de la densidad aparente 28
Figura 11. Mapa de densidad aparente..... 29
Figura 12. Dispersión, caja y bigotes de la densidad real 30
Figura 13. Densidad real en el área de estudio. 30
Figura 14. Dispersión, caja y bigotes de la porosidad del suelo..... 31
Figura 15. Clasificación de porosidad (Ramírez, 2016) 31
Figura 16. Porosidad en el área de estudio 32
Figura 17. Dispersión, caja y bigotes de la Resistencia a la penetración 33
Figura 18. Resistencia a la penetración en el área de estudio..... 33
Figura 19. Dispersión, caja y bigotes de la conductividad hidráulica del suelo..... 34
Figura 20. Conductividad Hidráulica del área de estudio. 34
Figura 21. Dispersión, caja y bigotes de la Humedad del suelo..... 35
Figura 22. Humedad del área de estudio..... 35

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. Coordenadas de ubicación de los puntos de muestreo..... 22

Tabla 2. Coordenadas de ubicación de los puntos de muestreo..... 28

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Sistema Técnico	Definición
Dr	Densidad real		—	capítulo 1
Da	Densidad aparente			capítulo 1
K	Conductividad hidráulica		—	capítulo 1
RP	Resistencia a la penetración		—	capítulo 1
H	Humedad	%		capítulo 1

Abreviaturas

Abreviatura	Término
X(mE)	Coordenadas en dirección Este
Y(mN)	Coordenadas en dirección Norte
Z(msnm)	Altura sobre nivel del mar

Introducción

El suelo es un recurso natural dinámico, en el que suceden procesos pedogenéticos, estos cambios pueden ser influenciados por el hombre, debido a las actividades que desarrolla. Uno de los problemas de degradación que afecta gran parte de los suelos del mundo es la densificación y compactación, cuya causa principal es el uso intensivo entre otros de maquinaria agrícola, bajo condiciones no aptas para el laboreo del suelo (Kuncoro, Koga, Satta, & Muto, 2014).

La compactación de los suelos se ocasiona cuando se ejerce una fuerza sobre la superficie a tal punto que se produce una deformación en su estructura, una reducción de la porosidad, ocasionando un aumento de la densidad aparente. Dicho fenómeno afecta otras propiedades físicas como la conductividad hidráulica y la difusividad de los gases en el medio edáfico, esto afecta el normal desarrollo de las raíces de las plantas, disminuyendo la producción de los cultivos, además se generan condiciones anaeróbicas que contribuyen a la liberación de gases con efecto invernadero. (Kuncoro, 2014; Ball., Parker, & Scott, 1999)

La compactación es un problema invisible, acumulativo y persistente (Horn, Domzal, Jurkiewicz y Ouwerkerk, 1995; Barik, Aksakal, Islam, Sari y Angin, 2014), pero también puede considerarse como una degradación reversible, previsible y controlable (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación [FAO], 2018), debido a la importancia de esta forma de degradación del suelo y la afectación del rendimiento de los cultivos, se requiere un diagnóstico para conocer el grado de compactación que presentan los suelos dedicados a una actividad agrícola intensiva, en este caso en el municipio de Campoalegre-Huila, información que servirá de soporte técnico en la formulación de planes de mejoramiento y recuperación del suelo tanto por los agricultores como por las entidades gubernamentales responsables del tema.

Para evaluar la compactación se midieron algunas propiedades físicas entre ellas la conductividad hidráulica del suelo (K), resistencia a la penetración (RP), densidad aparente (Da), densidad real (Dr) y porosidad (%P) en 101 muestras de suelo a una profundidad entre 0 y 20 cm, se elaboraron mapas de variabilidad espacial de cada propiedad, permitiendo realizar el análisis de cada variable en el área de estudio.

Objetivos

General

Realizar un diagnóstico de la compactación de los suelos bajo el cultivo de arroz en el municipio de Campoalegre, Huila

Específicos

Determinar las propiedades físicas de densidad aparente, densidad real, porosidad, resistencia a la penetración y conductividad hidráulica y su relación con la compactación del suelo.

Elaborar los mapas de variabilidad espacial de cada propiedad en el área de estudio, para determinar las zonas afectadas por compactación.

Identificar las estrategias utilizadas para prevenir, controlar y restaurar la compactación del suelo.

1. Marco Conceptual

En Colombia el área destinada para cultivos según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2017), fue de 4618644.00 ha para el año 2016. Los cultivos de mayor participación fueron 35.9% cultivos agroindustriales (Café, cacao, tabaco, caucho, algodón, soya, caña panelera), 22.0% cereales (arroz, maíz amarillo, maíz blanco) y 17.9% plantaciones forestales. En los cereales el cultivo de arroz representa la mayor área sembrada con 599799.00 hectáreas.

Durante el primer semestre de 2018 el área sembrada en arroz mecanizado se concentró en los departamentos de Casanare, Tolima, Meta y Huila con 253095 ha, a nivel nacional se presentó una disminución de 19.4% en el área sembrada con respecto al primer periodo de 2017, la producción total de arroz paddy verde en Colombia fue de 1020738.00 toneladas registrando un crecimiento de 3.1% con respecto al mismo periodo del año anterior. El mayor crecimiento en la producción la registró el grupo de departamentos de Antioquia, Arauca, atlántico, Bolívar, Caquetá, Cauca, Cesar, Choco, Córdoba, Cundinamarca, La Guajira, Guaviare, Magdalena, Nariño, Norte de Santander, Santander, Sucre, Vichada y Valle del Cauca. (15.1%) con 45711.00 toneladas más, seguido por Tolima (6,6%) con un aumento en la producción de 24310.00 toneladas, con respecto al mismo periodo del 2017, (DANE, 2018)

En el departamento del Huila uno de los cultivos de mayor importancia es el arroz, después del cultivo de café. Siendo el municipio de Campoalegre el que representa la mayor área sembrada con 10008.00 ha para el año 2014 (Ministerio de agricultura, 2016). En el primer semestre de 2018, los mayores rendimientos se registraron en los departamentos de Huila y Tolima, con 7,2 t/ha cada uno. La menor variación en el rendimiento del cultivo de arroz mecanizado, se presentó en el departamento del Tolima con 1,9%, al producir 7,2 t/ha frente a 7,1 t/ha registradas en el mismo periodo de 2017. Mientras que el grupo Resto departamentos presentó el mayor crecimiento en el rendimiento (5,2%) al producir 4,4 t/ha en el primer semestre de 2018, frente a 4,2 t/ha en el primer semestre de 2017. (FEDEARROZ, 2018)

En el municipio de Campoalegre el cultivo de arroz se siembra principalmente en los valles aluviales del río Magdalena y río Neiva, que debido a su topografía plana a ligeramente ondulada, estos suelos se consideran aptos para la agricultura intensiva, son zonas en donde es común el empleo de maquinaria agrícola para el laboreo y cosecha del cultivo, las tierras son regadas superficialmente con las aguas del Rio Neiva y sus afluentes a través de canales abiertos que llegan a los predios, administradas principalmente por los distritos de riego de ASOOVEJERAS y USOIGUA.

1.1 ¿Qué es compactación?

La compactación del suelo puede ser originada por procesos naturales geológicos como cambios abruptos en sedimentos fluviales, por procesos pedogenéticos como la iluviación de arcillas, o por efectos antrópicos como el uso intensivo de maquinaria agrícola, (Schneider, Don, Hennings, Schmittmann y Seidel, 2017). En el presente estudio se analizó esta última forma de degradación relacionada con el manejo del suelo.

Según Bradford y Gupta (1986) y Pinzón y Amézquita (1991) se denomina compactación cuando se comprime una muestra de suelo al aplicar una fuerza externa, deformando su estructura y ocasionando una expulsión de aire, si esta compresión ocurre en una muestra saturada y la expulsión es de agua se le llama consolidación (como se citó en Valdés, Gonzales y Will, 2011).

La compactación es un proceso que reduce el espacio poroso, ocasionado por una fuerza que rompe y degrada la estructura del suelo, generalmente ocasionado por prácticas de labranza convencional, produciendo un adensamiento, que dificulta el desarrollo de las raíces de las plantas, este tipo de degradación puede llegar a ser reversible, previsible y controlable (FAO, 2018, Wu et al., 2018).

La compactación puede generarse en los primeros centímetros del suelo, conocida como, compactación de cama de arado, ocasionada por una labranza primaria en condiciones de humedad no adecuadas para su preparación, por una excesiva labranza secundaria y por la presión de contacto de los neumáticos, existe otro tipo de compactación en el subsuelo, denominada de suela de arado o pie de arado generada por la carga del eje de la maquinaria utilizada en las labores agrícolas, esta es más difícil de tratar debido a la profundidad en que se encuentra, estos procesos de compactación influyen en la calidad del suelo, afectando así, la productividad de los cultivos, la economía, la calidad ambiental y la seguridad alimentaria (Ishaq y Ibrahim, 2006).

La compactación es el proceso por el cual las partículas del suelo se reorganizan para reducir el espacio vacío debido a una carga superficial, lo que ocasiona el rompimiento de la estructura haciendo que las partículas sólidas del suelo se pongan en contacto más cercano entre sí, aumentando la densidad aparente, esta reducción del espacio poroso ocurre en la macro porosidad. (Chen, Weil y Hill, 2014)

La compactación al reducir el espacio poroso del suelo, también dificulta la circulación de los gases, produciendo efectos anaerobios, como la liberación de óxido nitroso y otros gases efecto invernadero según Ball, Parker y Scott, (1999) las mediciones N_2O en un suelo compactado bajo el cultivo de Cebada en Escocia aumento las emisiones de este gas.

1.2 Relación de la compactación con otras propiedades del suelo

La compactación puede estar relacionada espacial y temporalmente con otras propiedades del suelo. Este proceso contribuye a los procesos de adensamiento, al disminuir la cantidad de poros, deteriorando la estructura y rellenando los poros con partículas finas iluviadas ocasionando cementación en algunos suelos. (Sepúlveda, 2009. Cortes, Camacho y Leiva, 2013, Lozano, 2005)

La compactación afecta las propiedades físicas del suelos como la densidad aparente, la porosidad, produce cambios en la humedad, en el almacenamiento de agua en el suelo, en la conductividad hidráulica, la resistencia a la penetración, la estructura, afecta las propiedades químicas, el intercambio de nutrientes, los potenciales de óxido reducción, puede ocasionar perdidas de nitrógeno, al reducir el espacio poroso afecta los procesos biológicos como la actividad de los microorganismos, alterando el equilibrio ecosistémico, además incide en el intercambio de gases entre el suelo y la atmosfera, puede inducir impactos ambientales como la emisión de gases efecto invernadero y erosión del suelo (Russell, 1977; Pinzón et al., 1991; Valdés et al., 2011; Ishaq y Ibrahim, 2006; Husson, et al., 2018).

1.2.1 Densidad Aparente

La densidad aparente es definida como la relación entre la masa del suelo seco, por unidad de volumen de suelo inalterado ($kg.m^{-3}$ o $g.cm^{-3}$), como se encuentra en su estado natural, teniendo en cuenta el espacio poroso. La densidad aparente puede ser empleada como indicador de la compactación del suelo, además, está relacionada con la porosidad, el drenaje, la profundidad de la rizosfera, el agua disponible para las plantas, la disponibilidad de nutrientes y la actividad de los microorganismos en el suelo. (Pinot, 2001; Donoso, 1992; Rubio, 2010).

La densidad aparente es una propiedad física usada para describir la calidad del suelo (Armindo y Wendroth, 2016; Dam et al., 2005; Håkansson y Lipiec, 2000; Logsdon y Karlen, 2004; Moncada et al., 2015), se considera la segunda propiedad más importante después de la materia orgánica (Bondi, Creamer, Ferrari, fenton y Wall, 2018). También existen otros estudios que contradicen la anterior afirmación, como el desarrollado por Logsdon y Karlen (2004), donde concluyen que la densidad aparente no es un buen indicador de calidad de suelo.

Existen varios métodos para medir esta propiedad, como el método del terrón parafinado y el cilindro biselado que consisten en conocer un volumen y la masa del suelo seco y métodos de excavación y relleno. (Porta, López y Roquero, 1999, Rubio, 2010)

Existen manuales, normas y metodologías para la utilización de estos métodos por ejemplo BS EN 12580: 2001 en el Reino Unido, métodos LUFA y DIN en Alemania, Normas CEN 13041, 1998, CEN 12580, 1999, CEN 13040, 2006 en la UE, (Raviv y Heinrich, 2007), el manual "Soil Survey Fiel and Laboratory Methods Manual", del departamento de agricultura de los estados unidos (USDA, 2014), en Colombia estos métodos se encuentran compilados en el libro Métodos analíticos del laboratorio de suelos del instituto geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2006).

La densidad aparente del suelo también es empleada para convertir datos expresados en concentraciones a unidades de masa o volumen, cálculos empleados en planes de fertilización para cultivos (Rojas, 2012).

Según el estudio desarrollado por (Rojas, 2012), al comparar tres métodos de determinación de la densidad aparente del suelo; método del cilindro y el método del terrón parafinado, encontró que el método del cilindro genera menos error entre los datos analizados.

1.2.2 Resistencia a la penetración del suelo

Resistencia a la penetración, resistencia a la compresión, es la capacidad del suelo a resistir la penetración de un objeto rígido. (Amacher & O'Neill, 2004, Tenza, 2016), La resistencia a la penetración indica indirectamente la compactación (Hamza y Anderson, 2005; Kruger, Venanzi y Péreira, 2008).

La resistencia a la penetración se puede medir con un penetrómetro donde se manejan unidades de presión, se define como el esfuerzo uniforme equivalente que se proyecta uniformemente sobre el área proyectada del cono que equilibra la carga vertical sobre el mismo. También definida como la fuerza requerida para presionar un cono de 30° sobre el suelo, expresada en (kPa) (Abedin & Hettiaratchi, 2002; ASABE, 2006. Tenza, 2016).

La capacidad de las raíces para penetrar el suelo disminuye al aumentar la resistencia mecánica a la penetración, se considera limitante los valores mayores a 2 MPa (Soane, Blackwell, Dickson y Painter 1981, veronese. et al., 2006; Otto et al., 2011; Cortes, Camacho y Leiva, 2013), y a valores de 2,5 MPa, la capacidad de penetración de las raíces cesa enteramente (Pabin, Lipiec, Wlodek, Biskupsky y Kaus, 1998; Hamza y Anderson, 2005; Kruger et al, 2008).

La resistencia a la penetración es importante en la relación suelo, agua y planta, debido a que esta propiedad determina el tamaño, elongación, tasas de crecimiento de la planta, limitando la capacidad de que las raíces exploren horizontes más profundos en busca de las reservas de agua en el suelo o requieran un mayor costo metabólico para llegar a estas. (Atwell, 1990 ; Bengough, McKenzie, Hallett y Valentine, 2011 ; Grzesiak et al., 2014 ; Colombi, Kirchgessner, Walter y Keller, 2017; Colombi, Torres, Walter y Keller, 2018).

En algunos suelos donde el trabajo agrícola con maquinaria ha sido intensivo durante varios años, se produce compactación, algunos casos superficial o en un horizonte subsuperficial o también llamado “pie de arado, suela de trabajo”, en esta capa la resistencia a la penetración puede ser mayor que en superficie, debido a una mayor densidad, (White y Kirkegaard, 2010 ; Lynch y Wojciechowski, 2015; Colombi, et al., 2018)

La resistencia a la penetración del suelo se correlaciona positivamente con la densidad aparente del suelo y negativamente con la humedad, debido a que la resistencia a la penetración aumenta cuando el suelo está seco y cuando presenta densidades altas. (Bengough et al., 2011; Grzesiak et al., 2013; Colombi, et al., 2018).

Sepúlveda (2009) relaciona la compactación con la resistencia mecánica del suelo en una parcela de actividad caprina, en la cual encontró una correlación entre las dos propiedades donde la ecuación de regresión explico el 60% de la variabilidad de la densidad aparente a partir de la resistencia mecánica y la plasticidad del suelo.

1.2.3 Conductividad Hidráulica

La conductividad hidráulica del suelo es una propiedad hidrodinámica que permite medir la velocidad con que se mueve el agua en el suelo expresada en $m.día^{-1}$, $cm.h^{-1}$ o mmh^{1}, es un parámetro importante en el diseño de sistemas de drenaje, está relacionada con la porosidad debido que a mayor tamaño de poros, mayor es la conductividad hidráulica, por lo cual es una propiedad que depende fuertemente de la densidad aparente, porosidad, estructura y la textura. La conductividad hidráulica saturada del suelo se reduce con la compactación, como consecuencia de una disminución en la porosidad del suelo (Gonzalez, López y Gallego. 1997)

Pizarro (1978), describe la conductividad hidráulica del suelo o la permeabilidad como una de las propiedades más importantes del suelo en relación con su drenaje debido a que de esta depende el movimiento del agua en el suelo, influenciada por el número y diámetro de los porosidad del suelo, la conductividad tiene las mismas dimensiones que una velocidad, la conductividad hidráulica depende directamente de la estructura del suelo y no de su textura, alcanzando valores altos con estructura en bloques, prismática, granular y siendo claramente restringida con estructura laminar o masiva. Los valores de esta propiedad se pueden clasificar como muy baja valores <0.05 $m.día^{-1}$, baja valores entre 0.05 a 0.3 $m.día^{-1}$, media valores entre 0.3 a 1 $m.día^{-1}$, alta valores entre 1 y 5 $m.día^{-1}$ y muy alta valores >5 $m.día^{-1}$.

Los valores de la conductividad hidráulica son característicos para diferentes suelos a un contenido de humedad dado, influenciado por otras propiedades del suelo como la porosidad, la estructura y la textura, otro factor importante en la conductividad hidráulica es el componente biológico del suelo, debido a la porosidad generada por raíces y organismos del suelo, que forman canales conductores que pueden afectar el flujo de diferentes formas según la geometría, dirección e interconectividad de estos, por otro

lado los caudales además de las propiedades del suelo pueden variar mucho en función de las condiciones ambientales variables que determinan los gradientes hidráulicos en el sistema de flujo. (Hillel, 1998; Chesworth, 2008)

1.2.4 Porosidad

El volumen de un suelo está compuesto por la fracción ocupada por los sólidos, los líquidos y los gases, la porosidad es la fracción del volumen total de un suelo seco que se llena con aire en un momento dado (Soil Science Society of América. 2018). La porosidad es un índice relativo en un suelo, su valor generalmente oscila entre 0.3 y 0.6 (30-60%), depende del tipo de suelo, estructura (Ramírez, 2016) textura, desarrollo pedogenético, actividad biológica, uso y manejo, en los suelos arcillosos la porosidad es muy variable por los procesos de contracción y expansión que especialmente ocurren cuando en esta fracción predominan las arcillas tipo 2:1; sin embargo, la porosidad total no revela los tamaños y formas de los poros en el suelo (Hillel, 1998)

Lal (2006), menciona que la porosidad del suelo está compuesta por dos tipos de poros, poros intra-agregados espacios porosos microscópicos creados por la acomodación entre las partículas individuales de suelo y poros inter-agregados que representan el espacio causado por la disposición de los agregados, creados por la actividad biogénica, madrigueras interconectadas hechas por la fauna del suelo como canales de lombrices, raíces, contracción y expansión del suelo. Existe una clasificación de acuerdo al tamaño de los poros, <0.1 μm se denomina cryptoporo, de 0.1 a 5 μm, ultramicroporo; de 5 a 30 μm, microporo; de 30 a 75 μm, mesoporo y >75 μm macroporos, los poros con diámetro >30 μm se consideran contenedores de agua solo si el suelo está saturado o parcialmente drenado, mientras que los poros <30 μm se consideran almacenadores de agua disponibles para las plantas, este tipo de poros se encuentran dentro de los agregados del suelo.

Para una adecuada aireación, suministro de oxígeno a las raíces y plantas del suelo, Lal (2006), menciona rangos entre el 10% y 25% de la porosidad que debe estar ocupada por aire, valores entre 10 y 25% proporcionan baja impedancia mecánica para el crecimiento de raíces y un buen drenaje, valores menores a 10% se recomienda aflojar o drenar el suelo.

Para el cálculo de la porosidad total, se mide la densidad aparente (ρa) de una muestra sin disturbar con un volumen conocido y se analiza la densidad real (ρr) de este suelo, luego se aplica la siguiente ecuación:

$$\%Porosidad = 1 - \frac{\rho a}{\rho r}\ x\ 100$$

También existen otros métodos como el uso del picnómetro, desarrollado por Torstensson y Eriksson, basados en la Ley de Boyle, empleando un gas a presión, en una cámara sellada, la porosidad se calcula de la diferencia entre el volumen del aire

comprimido con la muestra de suelo y cuando está vacía, otro método es utilizando la micromorfología de suelo, analizando ópticamente láminas delgadas de suelo donde se observan el tipo, cantidad, forma y tamaño de los poros de una muestra representativa (Lal, 2006).

1.3 Métodos para estimar la compactación del suelo

La compactación, dependiendo del fin o el uso que se le quiera dar al suelo, puede ser beneficiosa o perjudicial, cuando se emplea el suelo para usos de ingeniería civil, como construcción de vías, cimientos, presas entre otras obras; se usa la compactación para aumentar la resistencia y reducir la permeabilidad del suelo, pero para fines agrícolas, forestales y de conservación de suelos sucede todo lo contrario, la compactación se vuelve un impedimento para la germinación de semillas, para el desarrollo de las raíces, afectando el crecimiento de las plantas y su producción.

En ingeniería civil se utiliza el método de proctor, que consiste en compactar una porción de suelo mediante un pistón que descansa sobre la superficie de la muestra en un cilindro de volumen conocido, variando la humedad, este método presenta dos variaciones, proctor estándar y proctor modificado, ambos ensayos se deben al ingeniero Ralph Proctor, estas pruebas se contemplan en las normas ASTM D-698, ASTM D-1557, UNE 103-500-94, estas pruebas determinan a través de una curva, la máxima densidad que es posible alcanzar para suelos en determinadas condiciones de humedad y energía, la diferencia entre ambos varia en la energía aplicada, de acuerdo al número de golpes, el peso y altura del pistón, el molde y numero de capas, la curva comienza desde su estado seco, la densidad aparente aumenta con la humedad del suelo y alcanza un punto máximo que representa la humedad óptima y la densidad seca máxima, luego la densidad disminuye, este comportamiento se debe a que un suelo seco resiste la compactación debido a su matriz rígida y alto grado de unión de partícula a partícula y resistencia a la deformación por fricción, cuando la humedad del suelo aumenta, debilita las uniones entre partículas, lubricándolas y reduciendo la fricción interna, en estas condiciones el suelo se compacta fácilmente hasta humedad del suelo se acerca a la saturación, a partir de este punto no es posible aumentar la densidad aparente a menos que se expulse el agua. (Lambe y Whitman, 1993; Hillel, 1998).

En busca de encontrar métodos para estudiar propiedades del subsuelo, la ingeniería civil desarrolló el penetrómetro, que luego tuvo sus aplicaciones en el campo agrícola, para estimar la compactación del suelo, teniendo en cuenta la penetrabilidad, que es la capacidad de perforar un objeto o sustancia, esta se mide por medio de un penetrómetro, este instrumento determina la dureza del suelo al medir la profundidad o la velocidad de penetración de un varilla impulsada por una fuerza conocida, la fuerza requerida para conducir o empujar este dispositivo en el suelo es una medida de penetración. Los resultados de este método se conocen como resistencia a la penetración y se dan en unidades de presión, fuerza sobre área (Pascales, kilopascales, megapascales), de esta forma el penetrómetro se usa en investigaciones agrícolas para comparar la resistencia a

la penetración con el desarrollo de raíces, crecimiento de la planta, producción de cultivos y la relación con otras propiedades del suelo (Perumpral, 1987; Lowery y Morrison, 2002; Chesworth, 2008).

El penetrómetro consiste en una varilla o eje con un extremo plano, una punta de cono o de placa plana, los penetrómetros con extremo plano se usan para evaluar la resistencia en la superficie del suelo o condiciones cerca a la superficie, los penetrómetros de punta cónica se usan para analizar las condiciones del perfil de suelo, existen penetrómetros dinámicos y estáticos; los dinámicos utilizan un numero de golpes para la penetración de la punta en el suelo y los estáticos utilizan una fuerza constante, los dinámicos utilizan martillos de diferentes masas para su funcionamiento, los cuales tienen correlaciones que son aplicables a cada equipo y diseño especifico, otros factores que influyen en los resultados son el ángulo, diámetro y rugosidad del cono, la tasa de penetración del penetrómetro, además de factores externos como la humedad del suelo y densidad aparente del suelo, distribución del tamaño de partículas, textura, tipo de suelo, desarrollo pedogenético, compresibilidad del suelo y fricción suelo-metal (Moraes, Silva, Zwirtes y Carlesso, 2014; Bradford, 1986; Otto, Silva, Franco, Oliveria y trivelin, 2011; Conte, Leiven, Trein, Mazurana y Deibiasi, 2008; Vaz, Manieri, De Maria y Tuller, 2011; Silva, Reichert, Reinert y Soraes, 2002; Silva, Reichert y Reinert, 2004; Dexter y Czyz, 2007; Lowery y Morrison, 2002; Beckett, et al., 2018). Existen actualmente equipos que permiten el registro de datos digitalmente, midiendo otros parámetros al mismo tiempo como la humedad, profundidad y punto de georreferencia.

Otro tipo de penetrómetro muy usado es el penetrómetro de bolsillo, este instrumento utilizado para medir la resistencia a la penetración de las capas superiores del suelo en campo o de muestras en laboratorio, maneja rangos de medición de 0.5 Mpa. Se compone de una carcasa, un muelle, una punta de penetración plana, un anillo deslizante y una escala, para su funcionamiento se debe presionar verticalmente contra el suelo, el anillo de medición se desliza sobre la escala indicando la fuerza máxima encontrada, Independientemente del diseño todos los penetrómetros miden principalmente la fuerza requerida para conducir el dispositivo verticalmente hacia abajo a través del perfil del suelo (Eijkelkamp, 2018). Los procedimientos para desarrollar las pruebas de resistencia a la penetración se basan en las normas EP542, S313.3 emitidas por la Sociedad Americana de Ingenieros Agrícolas y Biológicos (ASABE, 2006a; ASABE, 2006b; Moraes, et al., 2014)

1.4 Factores que causan compactación en el suelo

Existen actividades antrópicas que pueden producir compactación de los suelos destinados a la producción de cultivos, como el pastoreo y el laboreo del suelo; en los sistemas de labranza, el uso y tráfico intensivo de maquinaria agrícola, el excesivo laboreo del suelo y la remoción de la cobertura superficial son la causa principal de la compactación del suelo (Greenland, 1981; Packer *et al*., 1992; Botta et al 2007; Kuncoro, et al., 2014).

La compactación subsuperficial resulta más peligrosa porque involucra horizontes no labrados anualmente. Botta et al. (2015), reporta que cargas de 152.5 kN, producen aumentos de resistencia a la penetración con índice de cono, mayores de 2.5 M.Pa en el subsuelo, entre 200 y 600 mm de profundidad, en un suelo planesol. En condiciones extremas de compactación del subsuelo, se puede presentar una reducción en el rendimiento del cultivo de maíz hasta del 70% (Ishaq y Ibrahim, 2006).

La magnitud de la compactación depende también del tipo de marcha usada en el laboreo, la presión de inflado de los neumáticos, el tipo de suelo y el contenido de humedad (Ishaq y Ibrahim, 2006), en los suelos sembrados en arroz se debe tener especial cuidado con este último aspecto debido al sistema de riego por inundación que es muy frecuente en este cultivo, el cual maneja altos contenidos de humedad que pueden causar problemas de compactación Botta et al. (2015), cuando los suelos presentan un bajo contenido de humedad a hora de realizar las operaciones de labrado, la compactación disminuye significativamente (Hamza y Anderson, 2005; Gómez, 2011)

Shahgholi y Abuali (2015), realizaron ensayos en un suelo con 25% en arcilla, 29.34% limos y 45.66% arena, con un transductor de deformación para medir la compactación ocasionada por los neumáticos del tractor MF285 con ruedas traseras simples 18.4R30 de capa radial, con un enganche de vertedera en tres puntos, con un peso de 2086 Kg en el eje trasero, con una presión de inflado en las ruedas traseras de 100 Kpa, con humedades del suelo de 11%, 16% y 22%, con una densidad inicial de 1102 $Kg.m^{-3}$, la densidad aumento con el primer pase a 1204.2 $Kg.m^{-3}$, 1238.2 en el segundo, 1259 $Kg.m^{-3}$en el tercero, 1269 $kg.m^{-3}$ en el cuarto y con el quinto pase a 1274 $Kg.m^{-3}$, también reportaron un aumento en la densidad a mayor contenido de humedad, con una densidad máxima de 1330.2 $kg.m^{-3}$ a 22% de humedad, encontraron una disminución de la compactación con el aumento de la velocidad de arado, con densidades máximas a una velocidad de 1 $Km.h^{-1}$ y densidades mínimas a una velocidad de 5 $Km.h^{-1}$, y reportan deformaciones verticales en el suelo de 23, 17 y 14 mm a velocidades de 1, 3 y 5 $Km.h^{-1}$, y unas expansiones laterales de 6 mm a 1 $Km.h^{-1}$ y 3 mm a 5 $km.h^{-1}$ concluyendo que la velocidad del tractor disminuye el tiempo del contacto suelo-neumático, disminuyendo así el tiempo de compresión, al igual que a mayor contenido de humedad mayor compactación.

1.5 ¿Cómo reducir la compactación del suelo?

Para reducir la compactación se requiere de prácticas o tratamientos que permitan aumentar el número de poros del suelo, para un mayor movimiento de los gases y del agua en el suelo, romper los horizontes compactos para que las raíces puedan tener más área para su desarrollo. Cuando el suelo obtiene una mayor aireación existe un mayor crecimiento de las plantas (Jackson, 1962).

Una de las estrategias que se están implementando para evitar la compactación de los suelos, es el tráfico controlado, consiste en limitar el peso y la intensidad del tráfico sobre los suelos agrícolas además, se restringe los recorridos a carriles específicos, con el fin de reducir la compactación superficial y subsuperficial en el área cultivable, (Ishaq y Ibrahim, 2006), al respecto en estudios realizados por Botta et al. (2007) reportan un aumento en el rendimiento del cultivo de maíz de 33.7%, al aplicar tráfico controlado durante tres años.

Existe un enfoque de agricultura conservacionista, donde se agrupa un conjunto de técnicas que contribuyen al mejoramiento de la propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, una de estas estrategias es la siembra directa, labranza cero o labranza de conservación esta consiste en evitar la remoción del suelo y mantener una permanentemente cobertura vegetal de residuos de cosecha (Ramirez, Taboada y Gil, 2006; Botta et al. 2015).

FAO (2004), menciona que la tecnología de siembra directa puede ser aplicable para pequeños medianos y grandes productores, describe las siguientes características para su aplicación: los residuos de los cultivos deben ser distribuidos uniformemente y dejados en la superficie del suelo, no utilizar ningún implemento para voltear o labrar el suelo, o incorporar residuos de cosecha, las malezas son controladas mediante herbicidas desecantes no contaminantes, antes de efectuar la siembra, utilizar una sembradora especializada para cortar la cobertura y los residuos secos acumulados sobre el suelo, depositando la semilla y el fertilizante con una perturbación mínima, el control subsiguiente de las malezas se debe realizar con un herbicida preferiblemente post- emergente; se debe acompañar con otras técnicas como la rotación de cultivos debido a que promueve los niveles adecuados de biomasa para lograr una cobertura permanente, para ayudar en el control de malezas, plagas, enfermedades y mejorar la estructura del suelo, esta tecnología de siembra directa además de minimizar los efectos de la compactación del suelo, evita la pérdida por erosión, en un 90%, y aumenta la actividad biológica, la biodiversidad, previene organismos causantes de plagas debido a que mantiene el equilibrio ecológico; considerando la siembra directa como una tecnología de intensificación sustentable del manejo de recursos naturales.

Para el año 2000 en Brasil según FAO (2004), existían 12 millones de hectáreas con este sistema, aproximadamente el 30% de la superficie de los cultivos anuales en verano, el (INTA, 2011), reporta para Argentina una adopción de esta tecnología en 27 millones de hectáreas que representan el 81% del área cultivable en este país, que junto con avances en biotecnología y maquinaria agrícola han encontrado incrementos en la productividad de 1700 kg de maíz, 1400 kg sorgo y 800 kg en trigo por hectárea anual, un aumento del 25 al 40% más del rendimiento en los cultivos frente a la labranza tradicional, además menciona otros beneficios como: reducción de la cantidad de maquinaria utilizada, ahorro en combustible en un 40% con respecto a la labranza tradicional, extensión en la vida útil de la maquinaria, reducción de emisiones contaminantes, disminución de costras superficiales, mayor almacenamiento del agua en el suelo, aumento de materia orgánica. A este sistema de labranza cero también se la

atribuyen suelos más saludables debido al aumento de la biomasa microbiana, la actividad de enzimas y la dinámica de nutrientes según ensayos realizados en un inceptisol de la India por Pandey, Agrawal y Bohra (2014), con sistemas de labranza tradicional y labranza cero en los cultivos de arroz y trigo.

La aplicación de materia orgánica al suelo reduce los efectos adversos de la compactación, de acuerdo a los ensayos realizados por Kuncoro et al (2014), en donde se examinó el efecto de la compactación sobre la porosidad total y el contenido de aire en el suelo, en muestras de 0 a 15 cm mezcladas con materiales orgánicos (cascarilla de arroz, paja de arroz, compost, corteza de madera y aserrín) en un 20% del volumen total del suelo, se simuló la compactación en laboratorio aplicando cargas de compresión de 150, 225 y 300 Kpa, encontrando que la materia orgánica bloquea los poros del suelo, aumenta la capilaridad del agua, aumenta la porosidad, reduce la densidad aparente y mejora las propiedades de transporte de los gases y del agua en el suelo; Pagliai, Vignozzi y Pellegrini (2004), también encontraron un aumento en la porosidad y una mejor agregación del suelo con la adición de materiales orgánicos, además, la adición de materia orgánica y el uso de coberturas sobre la superficie del suelo contribuyen al aumento de la edafofauna, mejorando la porosidad, generada por canales de lombrices, madrigueras de insectos y la actividad biológica de los microorganismos.

Existen medios biológicos que contribuyen a la disminución de la compactación del suelo, mediante la formación de canales de raíces, se han investigado varias especies como el rábano forrajero (*Raphanus sativus* var), que contribuye con su sistema radical de arrastre a la disminución de la compactación al modificar algunas propiedades físicas del suelo (Chen, Weil y Hill, 2014), el crecimiento de raíces profundas de plantas perennes como la Leucaena *(Leucaena leucocephala)*, plantas anuales como mucuna *(Mucuna pruriens)* o guandul *(Cajanus cajan),* cubiertas de leguminosas a las cuáles se atribuye un aumento de los microporos del suelo creados por este tipo de raíces, raíces de alfalfa *(Medicago sativa)*, raíces de trébol dulce (*Melilotus officinalis)* y de guar *(Cyamopsis tetragonoloba)* pueden penetrar suelos duros. Se han evidenciado beneficios en los rendimientos de un cultivo de algodón luego de una cobertura en pasto bahía *(Paspalum notatum),* atribuido a una mayor profundidad en el sistema de raíces del pasto bahía (Ishaq y Ibrahim, 2006). Otro sistema relacionado con la descompactación por medios biológicos a través de las raíces es la rotación de cultivos, entre cultivos de plantas dicotiledóneas que tienen raíces más gruesas, mayor capacidad de propagación, gran fuerza de penetración, alternados posteriormente con cultivos de plantas monocotiledóneas como los cereales que presentan raíces más delgadas y fibrosas (Schneider et al., 2017)

Otra técnica empleada para combatir la compactación del suelo, es el arado con cincel, que permite de manera mecánica romper los horizontes duros, con esta herramienta se labra el suelo sin inversión, además favorece la tasa de infiltración y reduce la erosión.

Estudios realizados por Vallejos et al. (2014) en un paleudol petrocálcico de Argentina cultivado en soja afirman que la técnica de subsolar no influye en los contenidos gravimétricos de agua, ni se observó respuesta en la producción del grano, pero si favorecen la disminución de la resistencia a la penetración hasta los 17.5 cm durante 18 meses, aumenta la porosidad, a una profundidad de 12 a 17 cm durante el primer cultivo

posterior a la labor y ocasiona un incremento de macroporos en los horizontes superiores del suelo durante seis meses.

Aun se presenta incertidumbre sobre los efectos del subsolado en el rendimiento de los cultivos, en una revisión desarrollada por Schneider et al. (2017) en 45 artículos, muestran que el 60% relacionan la labranza profunda con un aumento del 6% en la producción, mientras que el 40% reportan una disminución del rendimiento, parece ser que los rendimientos de los cultivos no se puede relacionar solo con el sistema de labranza sino con condiciones específicas de cada sitio, pero lo que si se puede afirmar es que la labranza profunda en suelos donde existe un pie de arado, horizonte compactado o suela de labor permite el rompimiento de esta capa y aumenta la disponibilidad de recursos para las plantas, aumentan la resiliencia al estrés por sequía, reportándose rendimientos del 20% en la producción de cultivos en suelos con estas condiciones.

Los efectos benéficos de la labranza profunda o de una labor de descompactación mecánica pueden ser de corta duración y los suelos pueden volver a su estado inicial o incluso ser más vulnerables a fuerzas compactantes, ocasionando una recompactación todo depende del manejo posterior a esta práctica, por esta razón es recomendable complementar las técnicas mecánicas con los tratamientos biológicos y adecuadas formas de laboreo para obtener mayores resultados económicos y ecológicos de mayor duración (Ishaq y Ibrahim, 2006).

Hamza y Anderson (2005) sugieren las siguientes prácticas para evitar, reducir y prevenir la compactación de los suelos: disminuir la presión en el suelo ya sea al bajar la carga, cuando se trabaja con maquinaria o aumentar el área de contacto de las ruedas con el suelo, trabajar el suelo y permitir el pastoreo a la humedad óptima del suelo, reducir el número de pases por maquinaria agrícola y la intensidad y frecuencia del pastoreo, limitar el tráfico a ciertas áreas del campo, aumentar la materia orgánica mediante la retención de residuos de cultivos y pastos, eliminar la compactación mediante labranza profunda en presencia de un agente de agregación, rotaciones de cultivos que incluyen plantas con raíz pivotante profunda y fuerte, mantenimiento de una proporción de saturación de bases apropiada y una nutrición completa para ayudar sistema suelo planta a resistir las tensiones externas dañinas.

1.6 Estudios de compactación alrededor del mundo

Colombi *et al* (2018), evaluaron los efectos interactivos entre la resistencia a la penetración, la arquitectura de la raíz, la adsorción del agua y su efecto en el crecimiento y producción, en un cultivo de maíz, el ensayo se adelantó en el observatorio de estructura de suelo de Agroscope Zurich, Suiza en un pseudogleyed Cambisol de textura limosa con cuatro tratamientos de diferente resistencia a la penetración, suelos compactados y no compactados, labrados y no labrados después de la compactación,

encontrando que a mayor resistencia a la penetración en la capa superficial del suelo provocan sistemas de raíces menos profundos, mayor absorción de agua en la capa superficial del suelo lo que ocasionó un mayor secado y mayor resistencia a la penetración en superficie, como consecuencia se redujo el crecimiento de las raíces hacia horizontes más profundos y se redujo el crecimiento de la planta, en los tratamientos no labrados se encontró más del 50% de biomasa de raíces secas en los 12,5 cm superiores del suelo mientras que en los tratamientos labrados solo del 30 al 40% de biomasa de raíz seca, se hallaron resultados de resistencia a la penetración en el tratamiento compactado, no labrado valores superiores a 2Mpa y 3Mpa, mientras que en tratamiento no compactado y labrado raramente superó los 2 Mpa, y para los tratamientos no compactado, no labrado y compactado y labrado los valores fueron inferiores a 2 Mpa durante las primeras 5 semanas luego superaron los 2Mpa.

Wu et al. (2018), realizaron ensayos en China, para evaluar el rendimiento del trigo en suelos compactados con una densidad aparente de 1.6 $gr.cm^{-3}$ y en condiciones de anegamiento; encontrando una reducción del rendimiento del grano en 12% debido al anegamiento, un 4.8% debido a la compactación y un 20.7% bajo estas condiciones, los cambios fenológicos de la planta se evidenciaron en reducción de número de espigas, menor número de tallos, reducción de la biomasa por encima del suelo, aceleración de la senescencia de las hojas y reducción de la actividad fotosintética. Llegando a la conclusión que la etapa del cultivo más susceptible a estos dos efectos fue al momento del macollamiento de las plantas, la combinación de compactación con anegamiento provocó efectos negativos en el crecimiento de raíces y brotes.

Sivarajan, Maharloooei, Bajwa y Nowatzki (2018) estudiaron los efectos del tráfico de maquinaria agrícola sobre la resistencia de un suelo en Dacota del Norte EE.UU, evaluaron los efectos sobre el rendimiento de los cultivos de soja y maíz y el efecto de congelación y descongelación sobre la compactación, encontraron que el índice de compactación medido con un penetrómetro de cono siguen un patrón similar hasta 37.5 cm, con una compactación promedio en todo el perfil de 0 a 45 cm de 1.19MPa, a partir de esta profundidad presentan un fuerte aumento, los resultados para el subsuelo de 40 a 100cm de profundidad fueron en promedio de 2.5 MPa, encontraron que la humedad del suelo pudo explicar el 60% de la variabilidad del índice de compactación, también encontraron que el efecto de congelamiento y descongelamiento del suelo alivia el proceso de compactación.

Liu et al. (2016) estudiaron la aplicación de biocarbón como técnica para aliviar el estrés de la compactación del suelo en la provincia de Jiangsu-China, sobre el crecimiento del trigo, encontrando resultados positivos en una reducción del 21% de la densidad aparente del suelo incrementando un 17% de la porosidad, también encontraron que la compactación mostró un efecto de inhibición en el crecimiento del trigo disminuyendo el rendimiento del grano en un 18 %, la aplicación de biocarbón promovió el crecimiento vegetativo del trigo con una altura de planta 5% mayor, 12% en biomasa aérea y 10 % en biomasa de raíz, sin embargo no se observó diferencias significativas en el crecimiento reproductivo.

Kuncoro et al. (2014) estudiaron el efecto de la compactación sobre las propiedades del transporte de los gases y del agua en el suelo, dentro de estas la conductividad hidráulica, los ensayos fueron realizados en el campo experimental Takizawa de la universidad de Iwate en Japón, con muestras de suelo, utilizando diferentes tratamientos de materia orgánica; cascarilla de arroz, paja de arroz, compost, corteza de madera y aserrín, luego fueron compactadas a diferentes cargas 150, 225 y 300 kpa, donde se encontró que la compactación reduce la difusividad de los gases y la conductividad hidráulica del suelo, de los tratamientos con materia orgánica los que presentaron mejor efecto positivo a la resistencia a la compactación fueron el aserrín y la corteza de madera.

Barik, Aksakal, Islam, Sari y Angin (2014) estudiaron la variabilidad espacial de la compactación del suelo asociadas al tráfico de campo en una hectárea de suelo de la granja de investigación de la universidad de Erzurum, Turquía, utilizaron el método de Kriging para la elaboración de los mapas, evaluaron las propiedades de estabilidad de los agregados, densidad aparente, porosidad total, resistencia a la penetración y contenido de humedad, las muestras se recolectaron de 0 a 10 cm, 10-20 cm y 20 a 30 cm, 90 muestras no alteradas y 90 muestras después de la compactación, encontrando efectos más significativos en las profundidades de 0 a 10 cm en todas la variables evaluadas, la densidad aparente aumento en tasas de 14.5, 5.3 y 6.7%, una disminución en la porosidad en tasas de 12.1, 5.5 y 6.6% respectivamente, en promedio después de la compactación fue una disminución en estabilidad del agregado de 22.6% y de la porosidad total de 8.9%, y un aumento en la densidad aparente de 8.6%, la resistencia a la penetración de 43.3% y el contenido de humedad volumétrico de 12.7%.

Lozano (2005) elaboró un indicador de degradación de suelos en el Valle del Cauca Colombia, el índice de compactación se estimó combinando la densidad aparente con la humedad gravimétrica, evaluando cuatro categorías de propiedades del suelo: propiedades hídricas (conductividad hidráulica, infiltración, sortividad, tasa de distribución de la humedad volumetrica), capacidad de retención, estructura del suelo y condiciones físicas generales (textura, materia orgánica, penetrabilidad y distribución de poros), siguiendo tres vías para validar el índice de compactación, comportamiento de las propiedades físicas en cada unidad del mapa de compactación, tendencia de distribución del agua en el suelo, análisis multivariado, encontrando que el índice propuesto probo ser un buen indicador debido a que las unidades con compactación decrecieron las cualidades físicas evaluadas.

Cortes, Camacho y Leiva (2013) realizaron un análisis multivariado del comportamiento espacial y temporal de la resistencia del suelo a la penetración, en un suelo agrícola evaluando la resistencia antes de la labranza y después de la cosecha, en un lote sembrado con maíz en la sabana de Bogotá, Colombia, en una cuadricula de 25 x 25 m, con 32 puntos de muestreo y a hasta 60 cm de profundidad, logrando identificar áreas y capas con diferentes niveles de compactación, obteniendo resultados de resistencia a la penetración, mayores después de la cosecha con valores de <1.5 Mpa antes de la labranza y de 2.5 Mpa después de la cosecha, encontrando que la presión ejercida en la

superficie es transmitida a capas más profundas disipando su efecto hasta 50 cm de profundidad.

Pinzon, Alvarez y Mesa (2016), estudiaron la variabilidad espacial de la humedad y la compactación en suelos con diferentes coberturas vegetales en un área de 34.18 ha del municipio de Sogamoso, Boyacá-Colombia, se tomó 25 puntos de muestreo en una red rígida, se midió la resistencia a la penetración encontrando valores de 0,72 a 1,39 MPa, aumentando con la profundidad, esta propiedad presento una mayor dependencia espacial a mayor profundidad y la humedad presenta una moderada dependencia espacial a diferentes profundidades.

Gómez (2011) estudio la incidencia de la compactación ocasionada por el tractor en las propiedades físicas de un andisol, en Cundinamarca, Colombia, bajo diferentes intensidades de tránsito (0, 1, 3, 6 y 10 pases), para dos tractores con pesos de 3.3 y 2.6 ton, encontrando, en tres condiciones de superficies diferentes, a profundidades de 10 y 30 cm, encontrando diferencias significativas al sexto y décimo pase del tractor, incrementos en la densidad aparente, resistencia a la penetración por encima de 2 Mpa, disminución de la infiltración hasta de un 98%, dominancia de la microporosidad, altas correlaciones entre porosidad e infiltración.

Los estudios y reportes de cambios en la porosidad, resistencia a la penetración y compactación del suelo, en áreas productoras de arroz en Colombia son muy escasos. Con el propósito de obtener información en este tema se realizó una evaluación de las propiedades físicas del suelo, que tradicionalmente se encuentra cultivado con arroz en el Municipio de Campoalegre-Huila, evaluando la densidad aparente, la densidad real, la porosidad, la conductividad hidráulica y la resistencia a la penetración del suelo.

2. Metodología

2.1 Ubicación del área de estudio

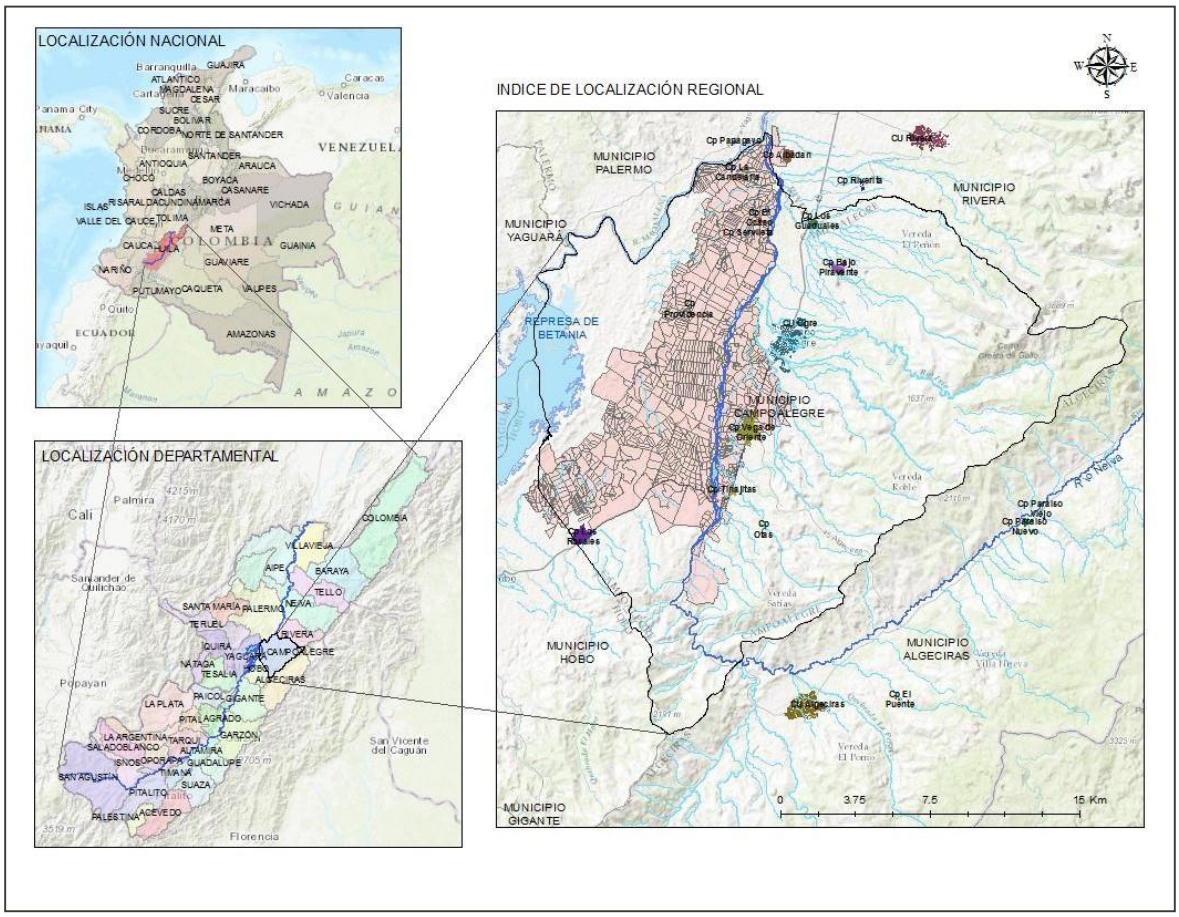
La zona de estudio se encuentra ubicada en la región arrocera del municipio de Campoalegre-Huila, ubicada en la parte baja de la cuenca del Rio Neiva, que a su vez hace parte del valle superior del rio Magdalena y del borde occidental de la cordillera oriental (Figura 1), en un área de 11.766,21 ha, que comprende los relieves plano a ligeramente ondulado. En las veredas El Rincón, Llano Norte, La Vuelta, Llano Sur, La Esperanza, Horizonte, Vilaco Bajo, Vega de Oriente, Rio Neiva y Rio Neiva Bajo.

Según la información geológica, geomorfológica reportada por la Alcaldía Municipal de Campoalegre (2005), Corporación autónoma regional del alto magdalena (CAM, 2011) y Morales, Caicedo, Velandia y Nuñes, (2001) el área de estudio está compuesta por depósitos cuaternarios, constituidos por intercalaciones de gravas, arenas gruesas y gravosas, conglomerados polimícticos, limos y arcillas, los clastos y granos son de composición ígnea y metamórfica, proveniente de la erosión de las rocas de la cordillera Oriental.

Geomorfológicamente la zona hace parte de los abanicos aluviales coalescentes poco disectados que se ubican sobre el flanco occidental de la cordillera oriental, cuyos ápices apuntan hacia esta, alimentados por descargas de materiales transportados y acumulados sobre el piedemonte, esta zona es plana a ligeramente ondulada la zona que bordea al Río Magdalena, Río Neiva, Quebrada La Ciénaga, se destaca la presencia de depósitos de terrazas, de origen coluvio aluviales, conformado por tres niveles Reciente, Subreciente y antiguos.

Según el estudio general de suelos del departamento del Huila (IGAC, 1994), las unidades cartográficas de suelos que mayor influencia tienen en la zona son las unidades en el paisaje de Valle de clima cálido seco a muy seco, relieve plano: VXDa y VXCa, la unidad VXDa se compone de los tipos de suelo Typic Ustropepts (35%), Typic Ustipsaments (35%) y tropic Fluvaquents (30%), la unidad VXCa, la componen los tipos de suelo Tropic Fluvaquents (35%), Vertic Ustropepts (35%) y Fluventic Haplustolls (30%); en una menor área se encuentran las unidades cartográficas VXEb2 constituida por los suelos Typic Haplustolls (40%), Typic Natrustalfs (40%), PXFb compuesta por los suelos Typic Haplustalfs (40%), Typic Ustorthents (35%) y Lithic Haplustalf (25%), PXAb, PXAb2, PXAc2 con los suelos Typic Ustropepts (45%) y Fluventic Haplustolls (40%), PXLa con suelos Typic Ustifluvents (35%), Fluventic Haplustolls (35%) y Typic Ustropepts (30%), PXCb compuesta por los suelos Aquic Haplustalf (85%), PXEd2 con suelos Lithic Utorthens (45%) y Typic Ustorthents (35%) y los vallecitos intramontanos de la unidad MXf2 compuesta por suelos Typic Ustorthents (50%) y Lithic Ustorthents (40%).

Figura 1. Ubicación espacial del área de estudio.



Fuente: basado en IGAC (2018)

El área de estudio se encuentra en el clima cálido seco, con altitudes menores a 1000 m, temperatura entre 25 y 28 °C, y una precipitación promedio anual de 1000 a 1500 mm, humedad relativa media entre 70 y 75% en esta zona los cultivos que predominan son de tipo semestral como el arroz (Figura 2), sorgo, tabaco, maíz, algunas área se dedican a cultivos como cacao, melón y también se encuentras usos pecuarios como ganadería y piscicultura. El municipio de Campoalegre se considera la capital arrocera del Huila, para el 2016 la producción fue de 88.838,00 ton en un área cosechada de 11.357,00 ha aproximadamente, con un rendimiento de 7,80 Ton/Ha (Ministerio de agricultura, 2016).

Figura 2.Cultivo de arroz en la vereda Vega de oriente, Municipio de Campoalegre- Huila.

Fuente: Imagen propia

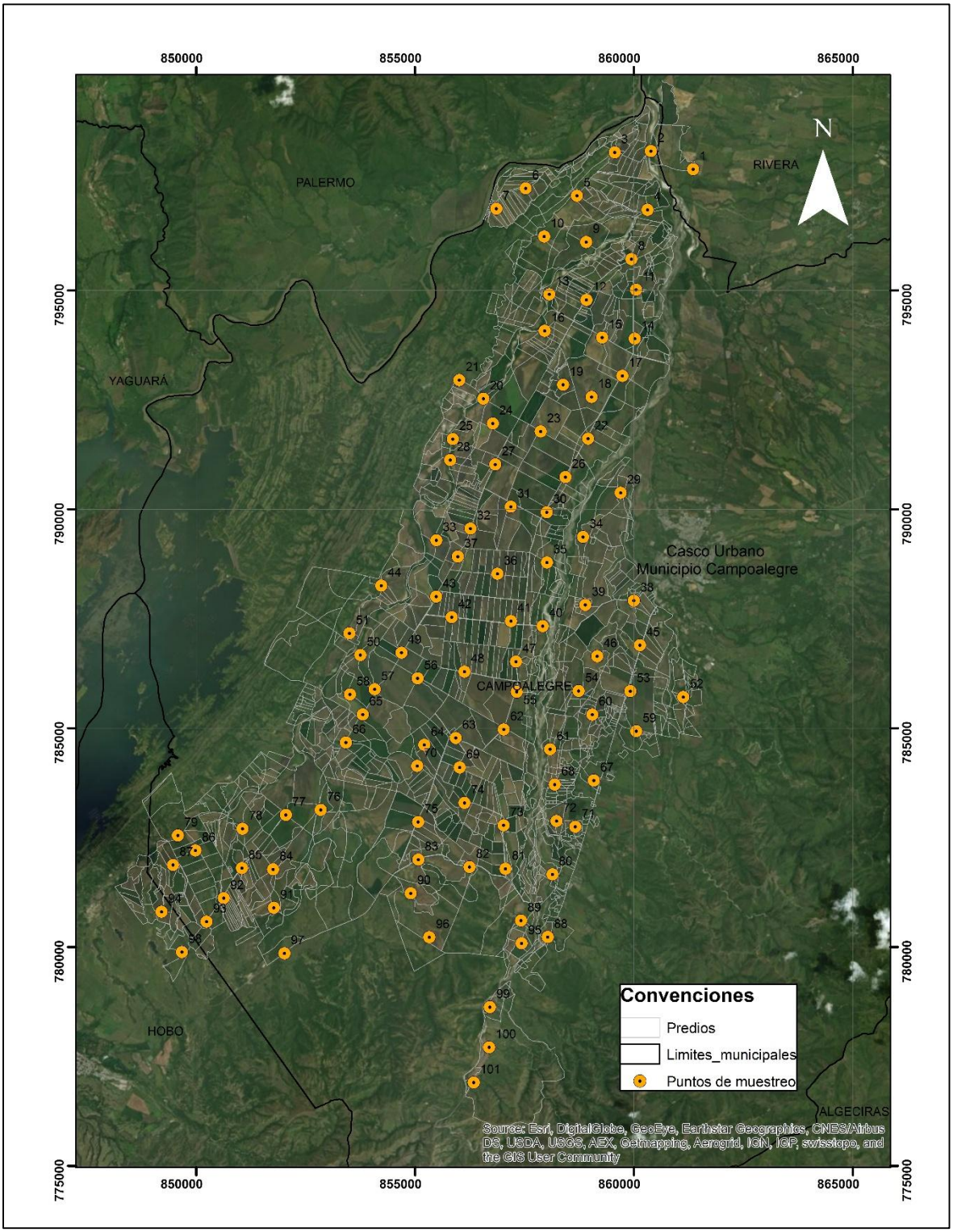
En el área de estudio se destaca la fuente hídrica Rio Neiva que nace en el ecosistema estratégico La Siberia y desemboca en el Rio Magdalena, de la cual se abastecen de agua para los cultivos de la zona, junto con sus afluentes quebrada La Ciénaga, quebrada Otas, quebrada la Caraguaja, quebrada Sardinata, Rio Frio y quebrada Albadán.

2.2 Mediciones de campo y toma de muestras de suelo

Se trazó una cuadrícula con tamaño de celda de 1 km x 1 km, para cubrir el área de estudio, que comprende la zona arrocera del municipio de Campoalegre-Huila, se muestrearon 101 puntos en un área de 11.766,21 ha (Figura 3), en los cuales se evaluaron las propiedades de resistencia a la penetración, densidad aparente, densidad real, porosidad, conductividad hidráulica, porcentaje de humedad. La ubicación de los

puntos de muestreo se presenta en el siguiente mapa con las respectivas coordenadas de ubicación geográfica tomadas en campo (Tabla 1).

Figura 3. Puntos de muestreo de suelo sobre el área de estudio, Municipio de Campoalegre-Huila.



Fuente: modificado de Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community

Los puntos de muestreo fueron ubicados con GPS, se registraron las coordenadas y su altura sobre el nivel del mar (tabla 1).

Tabla 1 Coordenadas de ubicación de los puntos de muestreo

Punto	X (m Este)	Y (m Norte)	Z (msnm)	Punto	X (m Este)	Y (m Norte)	Z (msnm)
1	861351.47	797764.73	480.79	52	861129.61	785712.31	563.39
2	860386.77	798182.72	473.48	53	859916.26	785844.16	545.43
3	859559.39	798152.08	481.59	54	858735.14	785851.79	547.11
4	860311.83	796841.29	478.03	55	857323.51	785827.25	554.76
5	858698.06	797163.31	501.02	56	855055.44	786138.77	564.35
6	857527.22	797331.91	473.37	57	854076.35	785887.74	548.09
7	856854.95	796866.99	480.9	58	853513.85	785768.66	560.28
8	859943.07	795714.51	463.54	59	860053.92	784933.31	562.15
9	858910.25	796102.94	516.11	60	859048.91	785309.73	555.85
10	857948.78	796230.17	515.76	61	858084.19	784518.35	557.6
11	860049.77	795014.39	466.68	62	857024.31	784970.05	559
12	858912.63	794783.21	468.14	63	855930.83	784777.19	557.09
13	858067.04	794910.53	530.87	64	855211.78	784617.23	584.22
14	860019.34	793897.33	476.25	65	853804.67	785312.54	552.93
15	859272.08	793922.89	495.32	66	853419.81	784674.76	586.08
16	857959.38	794076.8	471.18	67	859083.52	783805.7	572.24
17	859734.95	793047.19	506.69	68	858191.92	783713.81	572.39
18	859030.74	792562.27	516.02	69	856018.33	784102.73	586.38
19	858382.39	792843.77	522.73	70	855049.1	784136.49	561
20	856560	792525.62	505.92	71	858658.1	782747.54	581.13
21	856009.01	792950.05	512.83	72	858230.33	782877.05	577.2
22	858951.33	791611.71	504.84	73	857019.82	782781.63	629.05
23	857867.86	791776.21	533.48	74	856126.27	783291.78	573.64
24	856774.72	791957.66	506.82	75	855069.9	782855.54	602.84
25	855860.97	791602.59	511.04	76	852842.32	783132.3	592.51
26	858434.23	790736.49	506	77	852046.11	783017.35	591.24

Punto	X (m Este)	Y (m Norte)	Z (msnm)	Punto	X (m Este)	Y (m Norte)	Z (msnm)
27	856831.12	791025.31	513.78	78	851055.02	782702.96	573.28
28	855802.84	791124.84	515.33	79	849581.44	782548.7	556.61
29	859696.24	790377.7	505	80	858139.99	781657.62	604.76
30	858007.62	789932.84	549.04	81	857063.4	781787.8	643.5
31	857185.91	790059.68	520.38	82	856240.66	781828.69	591.24
32	856262.43	789557.63	525.6	83	855073.12	781999.9	594.29
33	855483.12	789291.57	526.2	84	851756.57	781771.89	593.77
34	858837.77	789369	524.09	85	851044.04	781804.95	582.68
35	858010.86	788783.88	529.76	86	849982.63	782207.15	561.49
36	856881.31	788526.91	534.52	87	849468.59	781875.22	563.31
37	855974.67	788917.53	519.93	88	858028.98	780227.74	630.65
38	859997.79	787910.49	549.07	89	857419.03	780605.74	595.61
39	858886.54	787816.51	551.14	90	854902.36	781229.04	593.75
40	857913.58	787332.3	540.43	91	851772.55	780897.75	609.13
41	857191.17	787445.65	540.66	92	850630.18	781119.96	582.59
42	855836.18	787534.89	537.38	93	850237.61	780580.62	580
43	855479.08	788004.68	538.09	94	849209.15	780805.7	574.83
44	854229.7	788254.65	525.47	95	857432.96	780084.56	595.98
45	860137	786895.44	542.72	96	855326	780224.09	616.03
46	859158.84	786640.51	530.93	97	852012.16	779855.69	584.35
47	857304.66	786519.99	604.28	98	849673.46	779886.38	584.26
48	856129.96	786290.83	606.09	99	856708.54	778626.86	620
49	854687.22	786720.73	539	100	856692.73	777708.97	638.09
50	853749.39	786669.85	553.11	101	856339.18	776905.67	650.69
51	853501.33	787167.51	530				

Fuente: elaboración propia

En campo se realizó la medición de resistencia a la penetración y se recolecto las muestras de suelo (Figura 4), para el análisis de las otras propiedades en el laboratorio de física de suelos de la universidad nacional de Colombia, sede Medellín, siguiendo los métodos analíticos de laboratorio empleados por el IGAC.

Figura 4. Toma de muestras para densidad aparente del suelo. Imagen propia

Fuente: Imagen propia

2.2.1 Densidad aparente

Para la medición de la densidad aparente del suelo, se realizó por el método del Cilindro, se tomaron muestras sin disturbar en cilindros de 5 cm de diámetro, por 5 cm de altura (Figura 5), en cada punto de muestreo, a una profundidad de 0 a 30 cm, las muestras se llevaron al laboratorio donde se determinó la masa del suelo y se calculó la densidad con la siguiente ecuación.

$$Da = \frac{Mss}{Vc}$$

Da: Densidad aparente
Mss: Masa del suelo seco
Vc: Volumen del cilindro

Figura 5. Muestra de suelo en cilindro, para análisis de la densidad aparente

Fuente: Imagen propia

2.2.2 Densidad Real

La densidad real del suelo se determinó por el método del Picnómetro (Figura 6), se recolectó 200 g. de suelo, en cada punto de muestreo, se llevaron las muestras al laboratorio, donde se prepararon y se midió esta propiedad en el equipo pentapicnómetro 5200e.

Figura 6. Medición de la densidad real en el pentapicnómetro

Fuente: Imagen propia

2.2.3 Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración se determinó en campo (Figura 7), en la superficie del suelo, utilizando un penetrómetro de bolsillo en cada punto de muestreo, con un rango de medida 0-4,5 $kg.cm^{-2}$

Figura 7. Medición de la resistencia a la penetración.

Fuente: Imagen propia

2.2.4 Conductividad Hidráulica

La conductividad hidráulica del suelo se determinó por el método del permeámetro de cabeza constante, para lo cual se tomaron muestras de suelo inalterado en cilindros de PVC, de 2” de diámetro x 5 cm de altura, se llevaron al laboratorio donde se les coloco una malla a cada cilindro y se colocaron en un recipiente con una lámina de agua durante 24 horas (Figura 8), luego se procedió a realizar la prueba colocando una lámina de agua constante en la superficie del cilindro con la ayuda de otro cilindro, y se tomaron la medidas del volumen de agua que se filtra a través del suelo. Durante un tiempo determinado, hasta que el flujo constante, luego se calculó la conductividad hidráulica aplicando la ecuación de Darcy.

$$K = \frac{v}{t\ x\ A}\ x\ \frac{\Delta L}{\Delta H}$$

K: conductividad hidráulica ($cm.h^{-1}$) V: volumen de agua (ml)

T: tiempo (min)

A: área de la columna de suelo (cm^2)

∆L: altura del suelo

∆H: altura del agua

Figura 8. Muestras para conductividad hidráulica de suelo.

Fuente: Imagen propia

2.2.5 Humedad

La humedad del suelo se determinó en el laboratorio, pesando las muestras del suelo húmedo, luego se secaron en un horno a 105°C, durante 24 Horas (Figura 9), se tomó el peso seco y se aplicó la siguiente ecuación.

$$W = \frac{Msh - Mss}{Mss} x100$$

Msh: Masa del suelo húmedo

Mss: Masa del suelo seco

Figura 9. Determinación de la humedad del suelo

Fuente: Imagen propia

3. Análisis de resultados y discusión

Los resultados de campo de la resistencia a la penetración junto con los resultados de laboratorio de las propiedades de densidad aparente, densidad real, conductividad hidráulica del suelo se analizaron a través del programa statgraphics V (Tabla 2), se elaboraron mapas de variabilidad espacial utilizando una interpolación por Kriging, siguiendo un modelo de semivariograma esférico, utilizando el software Arcgis.

Tabla 2. Resumen estadístico de las propiedades de suelos

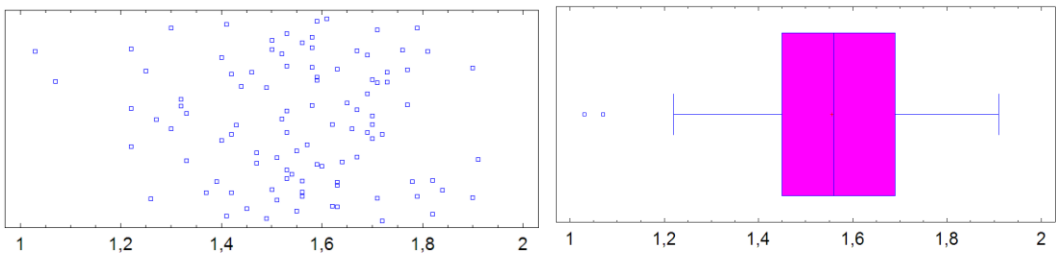
Variable	Varianza	Media	Frecuencia	Mínimo	Máximo	Rango	Asimetría típica	Curtosis típificada
Da (gr.cm-3)	0,03	1,56	101	1,03	1,91	0,88	-1,88	0,47
Dr (gr.cm-3)	0,01	2,68	101	2,55	2,86	0,31	-0,02	-0,06
Poros (%)	44,12	42,33	101	29,64	61,99	32,35	2,07	0,50
RP (K.cm-2)	0,73	1,87	101	0,25	3,68	3,43	0,57	-1,55
K (mm.h-1)	2062,99	37,01	101	0	184,63	184,63	6,19	3,33
H (%)	85,28	22,64	101	3,37	60,23	56,86	5,02	6,79

Fuente: Elaboración propia

3.1 Densidad aparente

Los valores de densidad aparente presentan una distribución normal, con valores mínimos de 1.03 y máximos de 1.91 gr.cm^{-3}, concentrados principalmente entre 1.2 y 1.8 gr.cm^{-3}, (Figura 10), la media aritmética es de 1,56 gr.cm^{-3}, esta densidad promedia se clasifica alta,

Figura 10. Dispersión de la densidad aparente, caja y bigotes de la densidad aparente

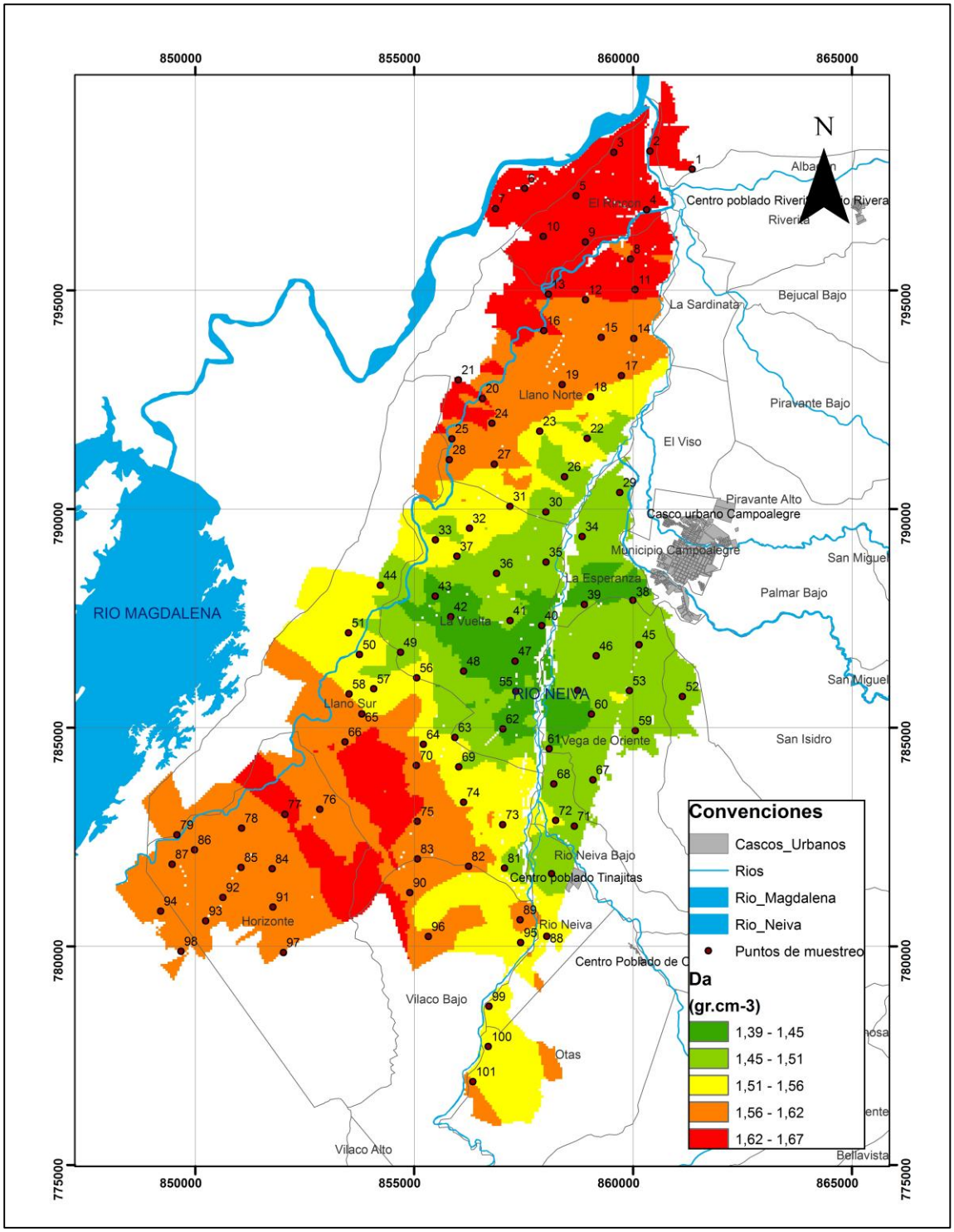


Fuente: elaboración propia

Se espacializaron los resultados en la zona de estudio, generando un mapa a través de la interpolación por el procedimiento de Kriging (Figura 11), en color verde se presentan las densidades más bajas encontradas sobre las veredas La Vuelta, Vega de Oriente, La Esperanza y Rio Neiva, en color amarillo, naranja y rojo las densidades medias a altas sobre las veredas Llano Norte, Horizonte, Vilaco Bajo y Llano Sur, de acuerdo a la densidad alta estas zonas pueden estar empezando un proceso de adensamiento.(USDA, 1993), donde se pueden implementar agricultura conservacionista, aplicación de materia

orgánica (Kuncoro et al., 2014) sistemas de siembra directa (FAO 2014, Botta et al. 2015), para evitar una futura compactación y reducir pérdidas de producción como las encontradas por Wu et al. (2018) cuando el suelo alcanza densidades mayores a 1.6 gr.cm^{-3}

Figura 11. Mapa de densidad aparente

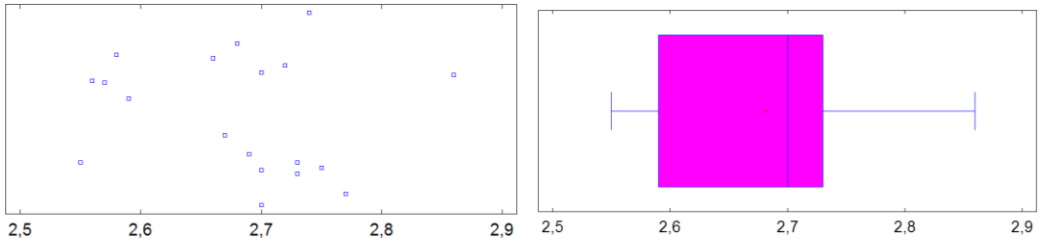


Fuente: elaboración propia

3.2 Densidad real

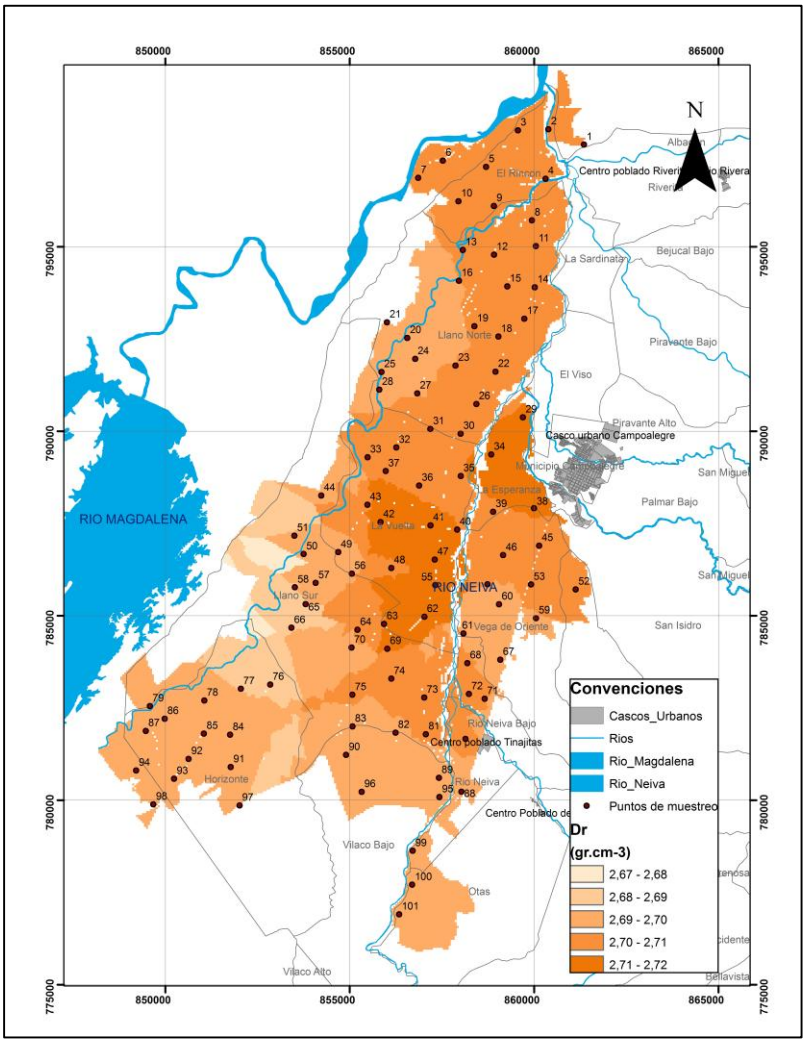
La densidad real fluctuó 2.55 a 2.86 gr.cm^{-3} (Figura 12), presentando una distribución de datos normales, con una varianza de 0.01, una media de 2.68 gr.cm^{-3}, promedio clasificado como una densidad real media y considerado como normal para suelos minerales, como los suelos aluviales del presente estudio formados por sedimentación actual y subreciente del rio magdalena y sus afluentes (IGAC, 1994). Los valores más altos se presentan al costado nororiental del área de estudio sobre las veredas Llano Norte, La esperanza y Vega de Oriente, mientras que los valores medios a bajos se encuentran al lado sur del mapa sobre las veredas Llano sur y Horizonte (Figura 13).

Figura 12. Dispersión, caja y bigotes de la densidad real



Fuente: elaboración propia

Figura 13. Densidad real en el área de estudio.

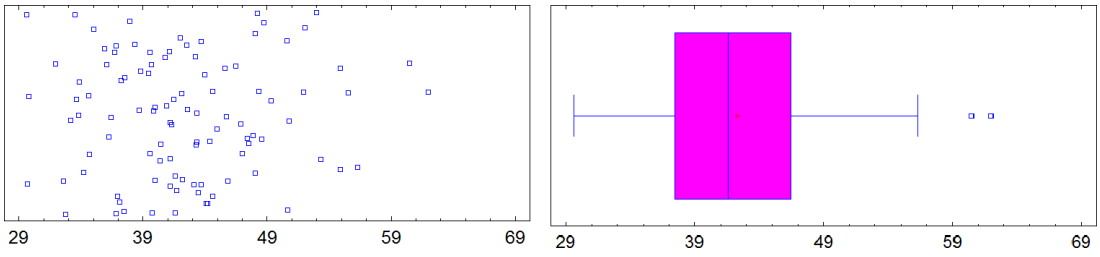


Fuente: elaboración propia

3.3 Porosidad

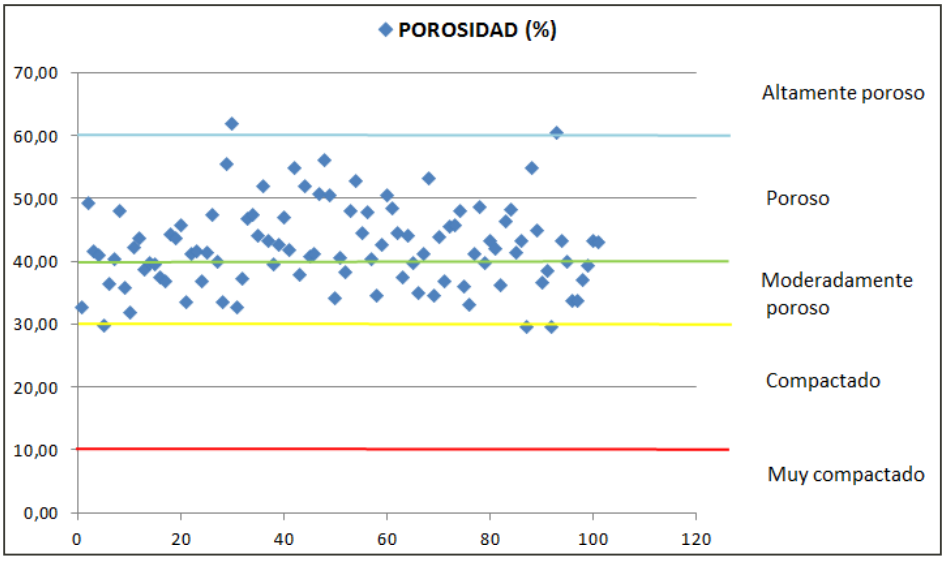
La porosidad se considera un indicador del estado de compactación del suelo (Botta, 2007), se registraron valores entre 29.6 a 62%, en donde el mayor número de datos estuvo entre el 37 y 47% (Figura 14), ubicados en las categorías de suelos moderadamente porosos a porosos (Figura 15), con un promedio de 42% cuyo valor corresponde a suelos porosos, según la clasificación de la porosidad propuesta por Ramírez (2016), en donde los suelos con valores de porosidad <10% se consideran muy compactos, de 10 a 30% se consideran compactos, de 30 a 40% moderadamente porosos, de 40 a 60% suelos porosos y mayores a 60% se clasifican como suelos altamente porosos.

Figura 14. Dispersión, caja y bigotes de la porosidad del suelo



Fuente: elaboración propia

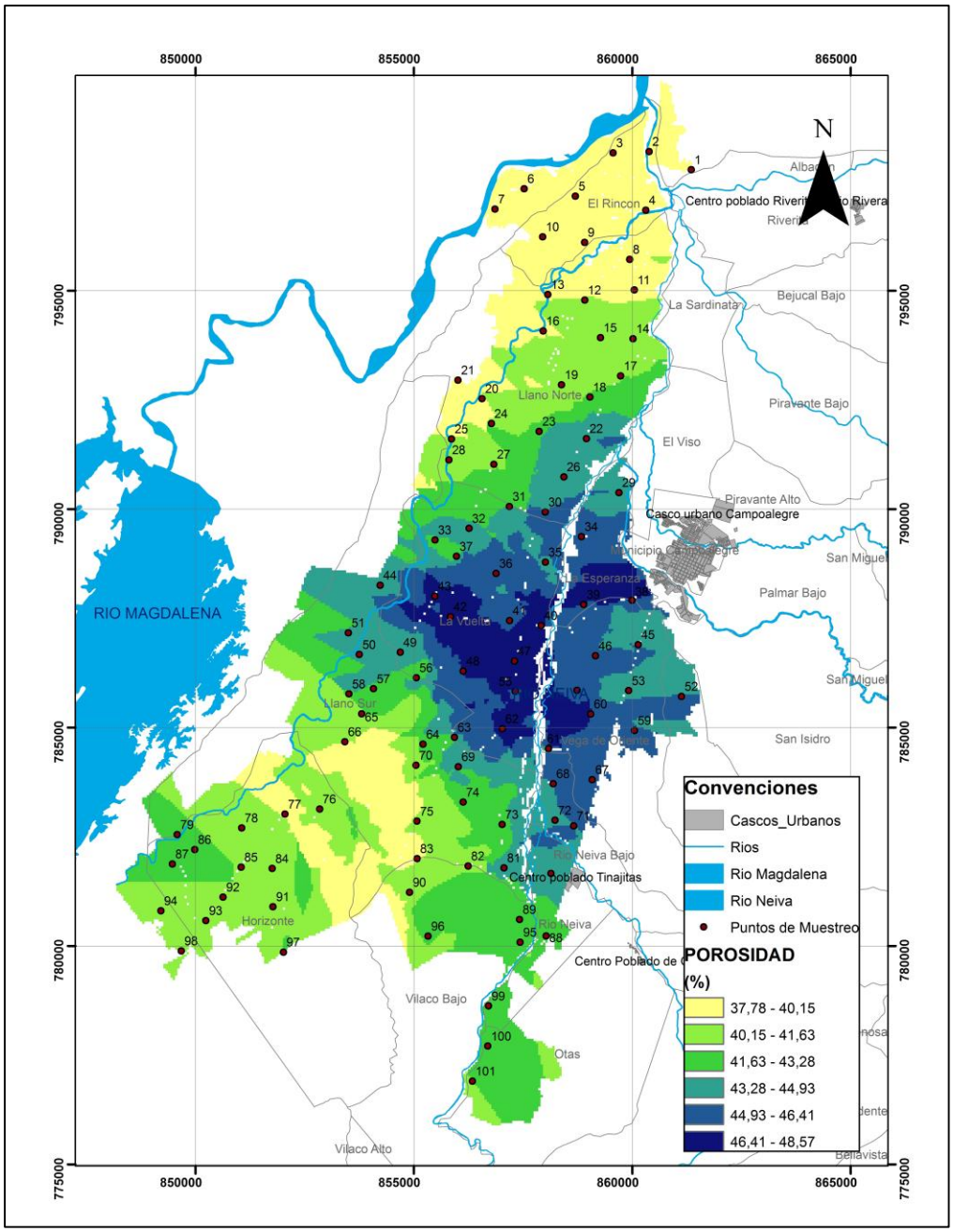
Figura 15. Clasificación de porosidad (Ramírez, 2016)



Fuente: elaboración propia

En la Figura 16 se presenta la distribución espacial de la porosidad del suelo, evidenciando zonas con porosidad más baja de color naranja en los extremos del mapa sobre las veredas Llano Norte y Horizonte y una porosidad más alta de color verde en el centro del área de estudio en las veredas Las Vueltas, Vega de Oriente y Rio Neiva Bajo, de esta forma se pueden establecer zonas de uso y manejo preventivo, para evitar procesos de compactación empezando por las zonas de menor porosidad.

Figura 16. Porosidad en el área de estudio

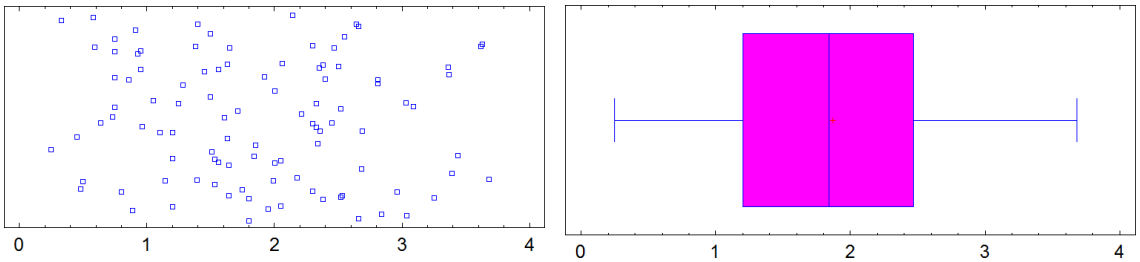


Fuente: elaboración propia

3.4 Resistencia a la penetración

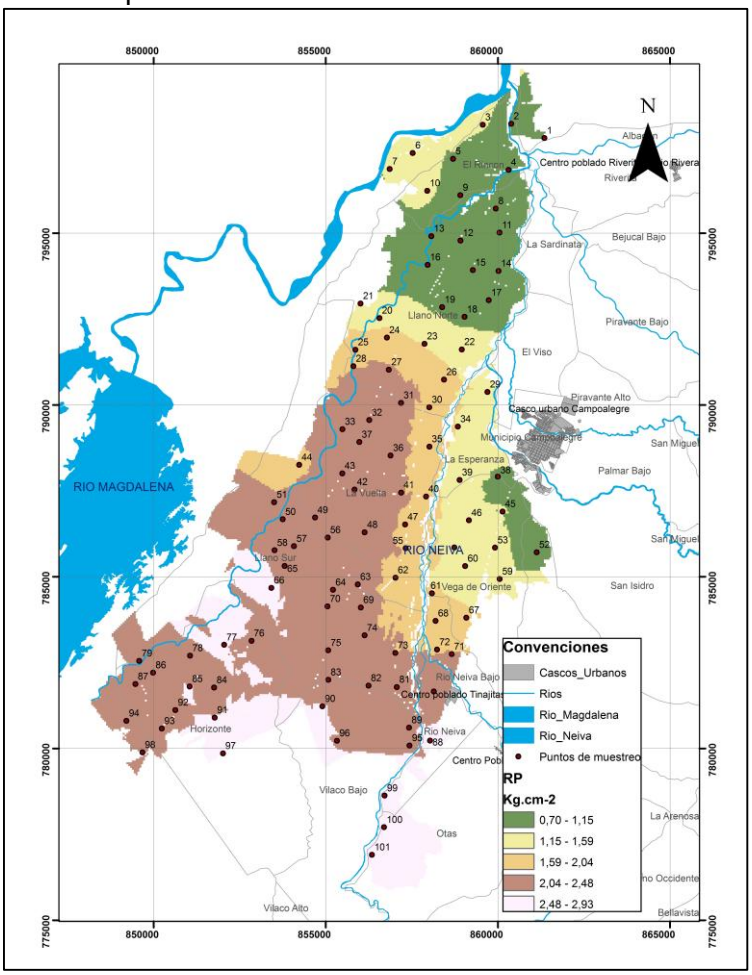
La resistencia a la penetración presentó un promedio de 1.87 kg.cm^{-2} clasificado como intermedio, con rangos de 0.25 Kg.cm^{-2} (0.025 Mpa) a 3.68 Kg.cm^{-2} (0.36 Mpa) (Figura 17), los valores obtenidos no se considera limitantes para la penetración de raíces, siendo menores a 2MPa (Soane, Blackwell, Dickson y Painter 1981, veronese Jr. et al., 2006; Otto et al., 2011; Cortes, et al., 2013). En la Figura 18 se evidencia la espacialización de la resistencia a la penetración donde los valores más altos se encuentran en la parte suroeste del área de estudio en las veredas Horizonte, Vilaco Bajo y Llano Sur y los valores más bajos en las veredas Llano Norte y el Rincón.

Figura 17. Dispersión, caja y bigotes de la Resistencia a la penetración



Fuente: elaboración propia

Figura 18. Resistencia a la penetración en el área de estudio.

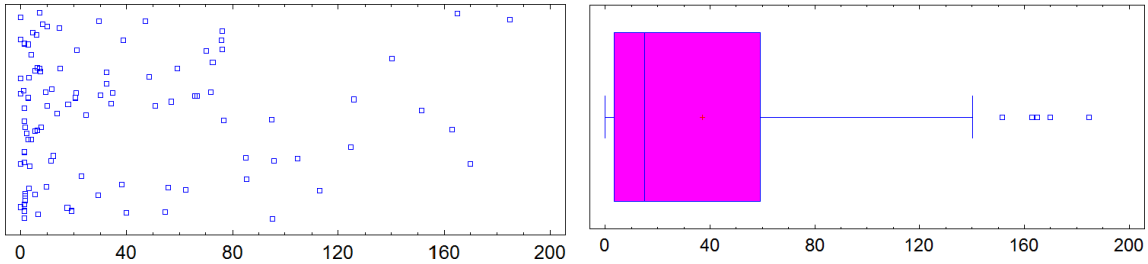


Fuente: elaboración propia

3.5 Conductividad hidráulica

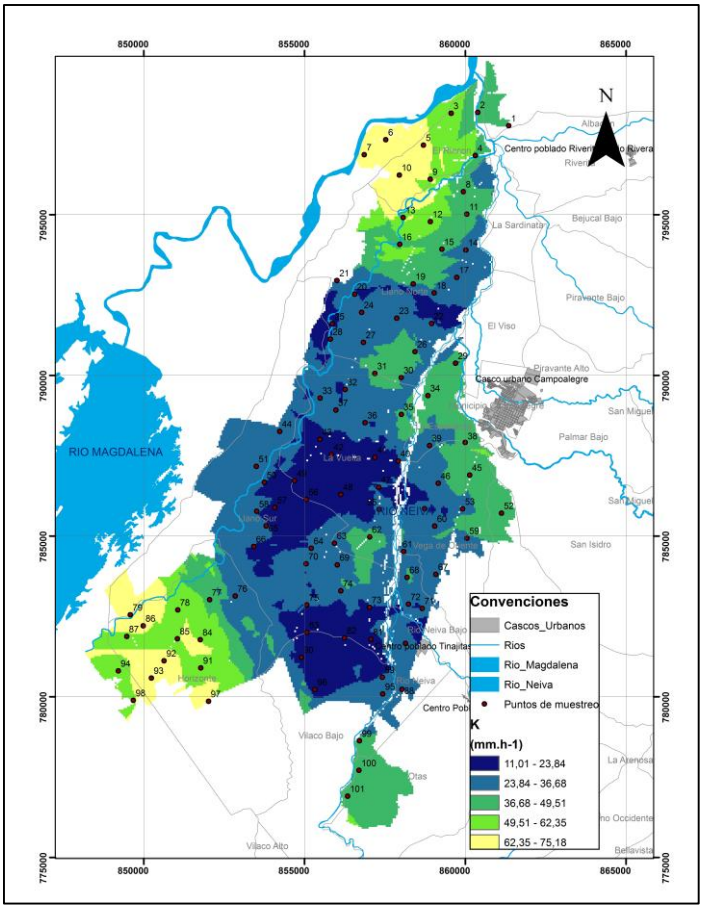
Los valores de conductividad hidráulica se presentaron de 0 a 184.63 mm.h^{-1} (4.43 m.día^{-1}), con una varianza alta (Figura 19) con un promedio de 37.01 mm.h^{-1} (0.89 m.día^{-1}), clasificada como una conductividad hidráulica media. En el siguiente mapa de conductividad se observa que los valores más altos se presentan a los costados norte y sur del área de estudio sobre las veredas El Rincón y Horizonte (Figura 20) y valores más bajos en el centro y oeste del área de estudio, debido a que los mapas de porosidad y conductividad no presentan una fuerte correlación, puede indicar que los valores bajos de conductividad están relacionados a la composición de los suelos por materiales más finos, estos suelos pueden llegar a permanecer más tiempo inundados situación favorable para el cultivo de arroz pero desfavorable para otro tipo de cultivos.

Figura 19. Dispersión, caja y bigotes de la conductividad hidráulica del suelo



Fuente: elaboración propia

Figura 20. Conductividad Hidráulica del área de estudio.

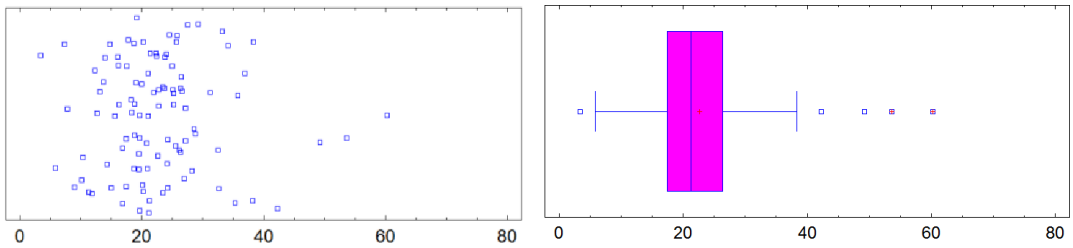


Fuente: elaboración propia

3.6 Humedad

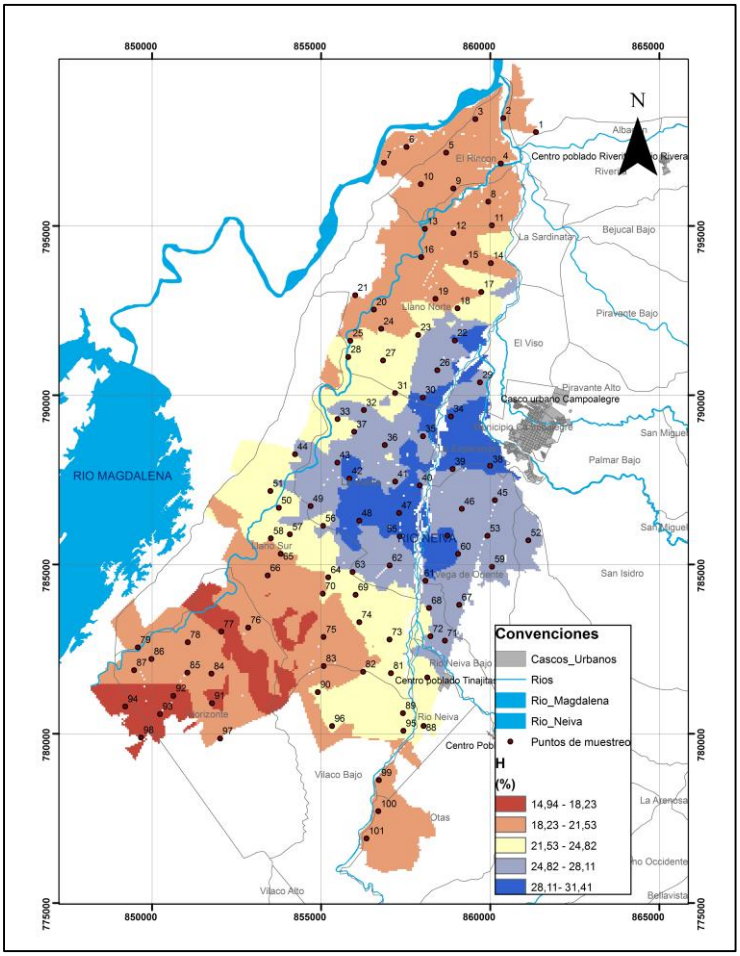
Las muestras de suelo recolectadas en campo presentaron contenidos de humedad de 3.37% a 60.23% con una varianza alta, (Figura 21), a continuación se presenta la distribución espacial de esta característica sobre el área de estudio, donde se evidencio valores de humedad más altos en el centro del mapa sobre las veredas La Vuelta, Vega de Oriente, La Esperanza y los valores más bajos de humedad sobre las vereda Horizonte, la distribución espacial de la humedad presenta correlación con la distribución de la conductividad hidráulica del suelo (Figura 22).

Figura 21. Dispersión, caja y bigotes de la Humedad del suelo



Fuente: elaboración propia

Figura 22. Humedad del área de estudio



Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

El suelo dedicado a la producción de arroz en el municipio de Campoalegre-Huila, presentó valores de porosidad que permiten clasificarlo como moderadamente poroso a poroso. Además, una conductividad hidráulica media, con una resistencia a la penetración inferior a 2MPa, estas condiciones no representan limitaciones para el desarrollo de las raíces del arroz, quedó evidenciado por tanto que estos suelos hasta una profundidad de 20 cm, no presentan compactación.

4.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar prácticas preventivas en todo el área de estudio para evitar la compactación de los suelos como la aplicación de materia orgánica, incorporación de residuos de cosecha, dejar las tierras en descanso durante un periodo de tiempo, donde se puede dejar crecer el barbecho natural o especies con raíces fuertes y profundas.

4.3 Anexo: Resultados de las variables medidas en campo y laboratorio.

N°	X (m Este)	Y (m Norte)	Z (msnm)	Da (gr/cm3)	RP (K/cm2)	K (mm/h)	Humedad (%)	Dr (gr/cm3)	Porosidad (%)
1	861351.47	797764.73	480.79	1.79	1.4	34.12	17.77	2.66	32.76
2	860386.77	798182.72	473.48	1.37	0.8	13.71	19.92	2.7	49.31
3	859559.39	798152.08	481.59	1.58	1.5	72.1	26.16	2.7	41.6
4	860311.83	796841.29	478.03	1.59	0.75	1.58	23.43	2.7	41.11
5	858698.06	797163.31	501.02	1.91	1.2	95	12.64	2.72	29.8
6	857527.22	797331.91	473.37	1.72	1.1	184.63	18.63	2.7	36.42
7	856854.95	796866.99	480.9	1.63	1.2	2.98	22.65	2.74	40.4
8	859943.07	795714.51	463.54	1.41	0.33	14.8	33.17	2.7	48.02
9	858910.25	796102.94	516.11	1.73	0.86	9.85	16.23	2.7	35.88
10	857948.78	796230.17	515.76	1.84	1.75	12.44	13.7	2.7	31.95
11	860049.77	795014.39	466.68	1.56	0.75	62.29	20.17	2.7	42.18
12	858912.63	794783.21	468.14	1.52	0.95	165.01	15.5	2.7	43.66
13	858067.04	794910.53	530.87	1.65	1.05	162.84	17.38	2.7	38.78
14	860019.34	793897.33	476.25	1.63	0.5	7.2	19.6	2.7	39.85
15	859272.08	793922.89	495.32	1.63	1.53	0	22.41	2.7	39.57
16	857959.38	794076.8	471.18	1.69	0.75	34.67	18.37	2.7	37.48
17	859734.95	793047.19	506.69	1.7	0.64	17.65	19.6	2.7	36.94
18	859030.74	792562.27	516.02	1.5	0.48	2.27	26.49	2.7	44.39
19	858382.39	792843.77	522.73	1.52	0.73	9.99	27.17	2.7	43.67
20	856560	792525.62	505.92	1.46	0.95	1.41	25.13	2.7	45.84
21	856009.01	792950.05	512.83	1.7	0.45	5.88	18.75	2.56	33.54
22	858951.33	791611.71	504.84	1.59	2	3.44	21.14	2.7	41.28
23	857867.86	791776.21	533.48	1.58	1.25	85.29	21	2.7	41.7
24	856774.72	791957.66	506.82	1.71	2.81	72.59	11.78	2.7	36.84
25	855860.97	791602.59	511.04	1.58	1.63	3.85	25.07	2.7	41.57
26	858434.23	790736.49	506	1.42	1.45	38.38	25.59	2.7	47.42
27	856831.12	791025.31	513.78	1.62	2.45	9.42	21.04	2.7	39.94
28	855802.84	791124.84	515.33	1.79	2.53	2.7	16.14	2.7	33.64
29	859696.24	790377.7	505	1.22	1.85	6.41	60.23	2.73	55.51
30	858007.62	789932.84	549.04	1.03	1.65	7.76	53.66	2.7	61.99
31	857185.91	790059.68	520.38	1.82	2.84	125.91	13.93	2.7	32.61
32	856262.43	789557.63	525.6	1.7	2.21	0.93	18.82	2.7	37.26

33	855483.12	789291.57	526.2	1.44	2.81	1.38	20.74	2.7	46.88
34	858837.77	789369	524.09	1.42	1.2	75.99	29.26	2.7	47.49
35	858010.86	788783.88	529.76	1.51	2.38	20.74	23.69	2.7	44.08
36	856881.31	788526.91	534.52	1.3	2.64	32.59	26.98	2.7	51.94
37	855974.67	788917.53	519.93	1.53	0.91	50.69	24.25	2.7	43.22
38	859997.79	787910.49	549.07	1.67	0.75	124.87	14.98	2.77	39.53
39	858886.54	787816.51	551.14	1.55	0.25	2.98	24.92	2.7	42.6
40	857913.58	787332.3	540.43	1.43	2.3	7.08	27.46	2.7	47.01
41	857191.17	787445.65	540.66	1.57	2.34	1.22	21.91	2.7	41.98
42	855836.18	787534.89	537.38	1.22	2.3	4.64	42.21	2.7	54.9
43	855479.08	788004.68	538.09	1.67	3.44	22.82	16.76	2.69	37.94
44	854229.7	788254.65	525.47	1.3	0.96	55.76	35.28	2.7	52.05
45	860137	786895.44	542.72	1.6	1.64	20.49	23.41	2.7	40.87
46	859158.84	786640.51	530.93	1.59	0.58	48.44	24.2	2.7	41.17
47	857304.66	786519.99	604.28	1.33	1.53	56.73	34.1	2.7	50.78
48	856129.96	786290.83	606.09	1.25	2.35	1.4	38.32	2.86	56.27
49	854687.22	786720.73	539	1.32	2.33	1.31	35.71	2.68	50.57
50	853749.39	786669.85	553.11	1.78	1.99	19	12.33	2.7	34.19
51	853501.33	787167.51	530	1.53	2.06	59.17	7.34	2.59	40.75
52	861129.61	785712.31	563.39	1.67	0.59	66.73	19.6	2.7	38.33
53	859916.26	785844.16	545.43	1.4	1.63	0	32.59	2.7	48.21
54	858735.14	785851.79	547.11	1.27	1.61	0	36.87	2.7	52.97
55	857323.51	785827.25	554.76	1.5	2.55	3.89	26.57	2.7	44.61
56	855055.44	786138.77	564.35	1.41	3.04	1.52	28.18	2.7	47.87
57	854076.35	785887.74	548.09	1.61	2.14	17.84	38.22	2.7	40.39
58	853513.85	785768.66	560.28	1.77	3.03	38.82	10.06	2.7	34.69
59	860053.92	784933.31	562.15	1.55	0.89	76.01	22.77	2.7	42.53
60	859048.91	785309.73	555.85	1.33	1.71	30.06	25.48	2.7	50.68
61	858084.19	784518.35	557.6	1.39	1.14	5.29	32.5	2.7	48.54
62	857024.31	784970.05	559	1.5	1.38	95.22	27.17	2.7	44.63
63	855930.83	784777.19	557.09	1.69	2	32.44	18.97	2.7	37.54
64	855211.78	784617.23	584.22	1.49	1.28	0	24.07	2.67	44.2
65	853804.67	785312.54	552.93	1.56	1.39	11.64	21.3	2.58	39.73
66	853419.81	784674.76	586.08	1.76	3.62	10.03	7.7	2.7	35.02
67	859083.52	783805.7	572.24	1.56	1.64	1.24	24.83	2.66	41.17
68	858191.92	783713.81	572.39	1.26	1.8	112.81	31.28	2.7	53.31
69	856018.33	784102.73	586.38	1.77	3.36	1.46	3.37	2.7	34.63
70	855049.1	784136.49	561	1.51	1.84	75.81	24.45	2.7	43.96
71	858658.1	782747.54	581.13	1.71	2.66	2.83	20.11	2.7	36.85

72	858230.33	782877.05	577.2	1.47	1.56	6.3	26.36	2.7	45.61
73	857019.82	782781.63	629.05	1.47	1.51	5.53	28.79	2.7	45.74
74	856126.27	783291.78	573.64	1.42	2.96	85.1	24.15	2.73	48.04
75	855069.9	782855.54	602.84	1.73	1.56	1.29	17.38	2.7	36.07
76	852842.32	783132.3	592.51	1.81	2.47	54.5	14.68	2.7	33.14
77	852046.11	783017.35	591.24	1.59	3.37	11.96	21.2	2.7	41.19
78	851055.02	782702.96	573.28	1.32	1.5	70.08	28.52	2.57	48.71
79	849581.44	782548.7	556.61	1.63	2.5	151.54	18.23	2.7	39.68
80	858139.99	781657.62	604.76	1.53	2.68	5.32	19.53	2.7	43.44
81	857063.4	781787.8	643.5	1.56	2.3	2.68	25.17	2.7	42.11
82	856240.66	781828.69	591.24	1.72	1.8	0	19.44	2.7	36.25
83	855073.12	781999.9	594.29	1.45	1.95	1.63	26.3	2.7	46.46
84	851756.57	781771.89	593.77	1.4	0.93	76.5	11.24	2.7	48.32
85	851044.04	781804.95	582.68	1.58	3.63	29.28	22.25	2.7	41.49
86	849982.63	782207.15	561.49	1.53	2.18	104.64	8.96	2.7	43.36
87	849468.59	781875.22	563.31	1.9	2.52	14.91	10.26	2.7	29.69
88	858028.98	780227.74	630.65	1.22	3.09	95.77	23.77	2.7	54.9
89	857419.03	780605.74	595.61	1.49	2.66	21.14	25.8	2.7	44.95
90	854902.36	781229.04	593.75	1.71	3.25	29.61	16	2.7	36.72
91	851772.55	780897.75	609.13	1.66	2.33	0	17.46	2.7	38.67
92	850630.18	781119.96	582.59	1.9	2.38	7.48	13.07	2.7	29.64
93	850237.61	780580.62	580	1.07	2.4	169.86	49.19	2.7	60.48
94	849209.15	780805.7	574.83	1.53	2.52	8.46	18.71	2.7	43.27
95	857432.96	780084.56	595.98	1.62	2.05	1.56	20.85	2.7	39.99
96	855326	780224.09	616.03	1.69	2.69	6.61	20.14	2.55	33.86
97	852012.16	779855.69	584.35	1.82	3.68	140.37	5.73	2.75	33.79
98	849673.46	779886.38	584.26	1.7	1.92	24.56	14.22	2.7	37.11
99	856708.54	778626.86	620	1.64	2.05	65.9	22.7	2.7	39.45
100	856692.73	777708.97	638.09	1.53	2.36	46.97	19.1	2.7	43.31
101	856339.18	776905.67	650.69	1.54	3.39	40.1	16.81	2.7	43.09

N°: número de muestra, Da: densidad aparente, Dr: densidad real, K: conductividad hidráulica, RP: resistencia a la penetración

Bibliografía

Abedin, M. Z., & Hettiaratchi, D. R. P. (2002). State Parameter Interpretation of Cone Penetration Tests in Agricultural Soils*. Biosystems Engineering*, 83, 469–479

Alcaldía Municipal de la Campoalegre. (2005). *Plan Básico de Ordenamiento Territorial Municipio De Campoalegre-Huila*. Campoalegre, Colombia.

Amacher, M. C., y O'Neill, K. P. (2004). *Assessing Soil Compaction on Forest Inventory & Analysis Phase 3 Field Plots Using a Pocket Penetrometer*. United States: United States Departament of Agriculture.

Armindo, R.A. y Wendroth O. (2016). Physical soil structure evaluation based on hydraulic energy functions, *Soil Sci. Soc. Am. J*, 80, 1167-1180.

ASABE. (2006). ASAE EP542 Procedures for Using and Reporting Data Obtained with the Soil Cone Penetrometer. American Society of Agricultural and Biological Engineers Standards, 1052–1055.

Atwell B.J. 1990. The effect of soil compaction on wheat during early tillering. III. Fate of carbon transported to the roots, *New Phytol., 115* (1), 43-49

Ball, B.C., Parker, J. P., y Scott, A. (1999). Soil and residue management effects on cropping conditions and nitrous oxide fluxes under controlled traffic in Scotland. *Soil and tillage Research*, *52*(3-4), 191-201.

Barik, K., Aksakal, E., Islam, K., Sari, S. y Angin, I. (2014). Spatial variability in soil compaction properties associated with field traffic operations*, Catena*, *120*, 122-133

Beckett, C., Bewsher, S., Guzzomi, A., Lehane, A. y Riethmuller, G. (2018). Evaluation of the dynamic cone penetrometer to detect compaction in ripped soils. *Soil and Tillage Research, 175*, 150-157

Bengough, A.G., McKenzie, B.M., Hallett, P.D., Valentine T.A. (2011). Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. *Journal of experimental Botany, 62* (1), 59-68.

Bondi, G., Creamer, R., Ferrari, A., y Wall, D., (2018). Using machine learning to predict soil bulk density on the basis of visual parameters: Tools for in-field and post-field evaluation. *Geoderma, 318,* 137-147.

Botta, G. F., Tolón-Becerra, A., Lastra-Bravo, X., Hidalgo, R., Rivero, D., Agnes, D. (2015). Alternatives for handling rice (Oryza sativa L.) straw to favor its decomposition in direct sowing systems and their incidence on soil compaction. *Geoderma, 239*(240), 213- 222.

Botta, G., Pozzolo, O., Bomben, M., Tourn, M., Soza, E., Rosatto, A. G., Stadler, S. (2007). Aplicación del tráfico controlado en la cosecha de maíz (zea mays l.): efecto sobre rendimientos del cultivo y las propiedades físicas del suelo. *Agro ciencia, 23* (1), 23-29.

Bradford, J. M. y Gupta, S. C. (1986). Soil compressibility en A. KLUTE. (ed.) *methods of soil analysis*. (pp. 479 – 492). Madison, USA: American Society of Agronomy.

Bradford, J.M. Penetrability. (1986). In: KLUTE, A. (ed.) Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods (463-478), Madison, USA: American Society of Agronomy.

Chen. G., Weil. R., Hill R. (2014), Effects of compaction and cover crops on soil least limiting water range and air permeability, Soil and Tillage Research, 136, 61-69

Chesworth, W. (Ed.). (2008). Encyclopedia of soil science, Dordrecht, The Netherlands: Springer.

Colombi, T., Torres, L. C., Walter, A., Keller, T. (2018). Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle, Science of The Total Environment, 626, 1026-1035

Colombi, T., Kirchgessner, N., Walter, A., Keller T. (2017). Root tip shape governs root elongation rate under increased soil strength, Plant Physiol., 174, 2289-2301.

Conte, O., Levien, R., Trein, C.R., Mazurana, M., Debiasi, H. (2008). Resistência mecânica do solo e força de tração em hastes sulcadoras de semeadoras-adubadoras em sistema de integração lavoura-pecuária. Engenharia Agrícola, 28(4), p.730-739, 2008.

Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena. (2011). *Plan de gestión ambiental regional del departamento del Huila (2011-2023)*. Neiva, Colombia.

Cortes, C., Camacho, J. y Leiva, F. (2013) Análisis multivariado del comportamiento espacial y temporal de la resistencia del suelo a la penetración. Acta Agronómica, 62(3). 268-278

Dam, R.F., Mehdi, B.B., Burgess, M.S.E., Madramootoo, C.A., Mehuys, G.R., Callum, I.R. (2005), Soil bulk density and crop yield under eleven consecutive years of corn with different tillage and residue practices in a sandy loam soil in central Canada, Soil Tillage Res., 84, 41-53.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2017). Encuesta nacional agropecuaria ENA-2016. Recuperado de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/agropecuario/enda/ena/2016/boletin_ena_2016.pdf

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2018). Encuesta Nacional de arroz mecanizado ENAM I semestre 2018, Recuperado de https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/arroz/bol_arroz_Isem18.pdf

Dexter, A.R.; Czyz, E.A.; Gat, O.P.A. (2007). Method for prediction of soil penetration resistance. Soil e Tillage Research, 93(1), 412-419.

Donoso, Z. C. (1992). *Ecología forestal*. Valdivia, Chile: Editorial Universitaria, Universidad Austral de Chile.

Eijkelkamp. (2018). Pocket penetrometer. Giesbeek, Holanda: Eijkelkamp. Recuperado de https://sp.eijkelkamp.com/productos/equipo-de-medici-n-de-campo/penetrometro-de-bolsillo.html

Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

FAO. (2018). [Soluciones para la compactación del suelo]. Recuperado 3 febrero, 2018, de http://www.fao.org/ag/ca/training_materials/cd27-spanish/sc/soil_compaction.pdf

FEDEARROZ. (2018). Encuesta DANE-FEDEARROZ confirmó que el área bajó lo recomendado, Revista arroz, 66, 40-48

Gómez, K., (2011) Incidencia de la compactación ocasionada por el tractor en las propiedades físicas en un andisol (tesis de maestría). Universidad nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Gonzales, H. Lopez A. y Gallego, M. (1997). La conductividad hidráulica de los suelos como función del contenido y de la tensión hídrica. Recuperado de http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos/article/viewFile/4096/4025.

GREENLAND, D. J. (1981). Soil management and degradation. J Soil Sci 32, 301-322.

Grzesiak, M.T., Ostrowska, A., Hura, K., Rut, G., Janowiak, F., Rzepka, A., Hura, T., Grzesiak, S. (2014). Interspecific differences in root architecture among maize and triticale genotypes grown under drought, waterlogging and soil compaction, Acta Physiol. Plant., 36, 3249-3261.

Grzesiak, S., Grzesiak, M.T., Hura, T., Marcińska, I. , Rzepka A. (2013). Changes in root system structure, leaf water potential and gas exchange of maize and triticale seedlings affected by soil compaction, Environ. Exp. Bot., 88 , 2-10.

Håkansson, J. Lipiec (2000), A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction Soil Tillage Res., 53, 71-85.

Hamza, M. y Anderson, W. (2005). Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions. Soil and Tillage Research, 82, 121-145.

Hillel, D., (1998), Environmental soil Physics, San Diego, USA: Academic press an imprint of Elsevier

Horn, R., Domzal, H., Jurkiewicz, A. y Ouwerkerk, C. (1995). Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. Soil Tillage Research, 35, 23-36

Husson, O., Brunet, A., Babre, D., Charpentier, H., Durand, M., y Sarthou, J. (2018). Conservation Agriculture systems alter the electrical characteristics (Eh, pH and EC) of four soil types in France. Soil and Tillage Research, 176, 57-68.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (1994). *Estudio General de suelos y Zonificación de Tierras del Departamento del Huila tomos I y II*. Bogotá, Colombia.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2006). Métodos analíticos del laboratorio de suelos, Bogotá, Colombia: imprenta Nacional de Colombia.

Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2018). Sistema de información geográfica para la planeación y ordenamiento territorial. Bogotá, Colombia: *SIGOT.* Recuperado de http://sigotn.igac.gov.co/sigotn/frames_pagina.aspx

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (2011).Siembra directa (58). Recuperado de https://inta.gob.ar/documentos/siembra-directa

Ishaq, M., e Ibrahim, M. (2006). Compaction and Crop Yield. En Lal, R. (Ed.), Encyclopedia of Soil Science (310-316). New York, USA: Taylor & francis group.

Jackson L. (1962). The relation of soil aeration to the growth of potato sets, American Potato Journal, 39, 436-438

Kruger, H., Venanzi, S. y Pereira, E. (2008). Efecto del pastoreo sobre la resistencia mecánica del suelo en sistemas de producción bajo siembra directa continúa. Ciencia del suelo, 26(2). 211-217.

Kuncoro P, Koga K, Satta N., y Muto Y. (2014). A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water I: Relative gas diffusivity, air permeability, and saturated hydraulic conductivity, Soil and Tillage Research (143), 172-179

Lal, R. (Ed.). (2006). Encyclopedia of soil science, New York, USA: Taylor & francis group.

Lambe, T.W., Whitman, R. V. (1993). Mecánica de suelos, México; Limusa Noriega editores.

Liu, Q., Liu, B., Zhang, Y., Lin, Z., Zhu, T., Sun, R., Wang, X., Ma, j., Bei, Q., Liu G., Lin, X., Xie, Z. (2016). Can biochar alleviate soil compaction stress on wheat growth and mitigate soil N2O emissions?, *Soil Biology and Biochemistry*, 104, 8-17.

Logsdon, S. D y Karlen, D. L. (2004). Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage, *Soil and Tillage Research, 78* (2), 143-149

Lowery, B., Morrison, J.E. (2002). Soil penetrometers and penetrability. In Dane J.H. and Topp, G.C. (eds.), Methods of soil analysis, Part 4 Physical methods. Soil Science Society of America, Madison, WI. 362-388.

Lozano, J., (2005) Puesta a prueba de un indicador sencillo de degradación en suelos histeréticos del Valle del Cauca, Colombia. Acta Agronómica, 54 (2), 1-14.

Lynch, J.P., Wojciechowski T. (2015). Opportunities and challenges in the subsoil: pathways to deeper rooted crops, J. Exp. Bot., 66. 2199-2210

Ministerio de agricultura. (2016). Evaluaciones agropecuarias municipales. Recuperado de http://www.agronet.gov.co/Documents/HUILA2016.pdf

Moncada, M.P., Ball, B.C., Gabriels, D., Lobo, D., Cornelis W.M. (2015). Evaluation of soil physical quality index S for some tropical and temperate medium-textured soils un Soil Sci. Soc. Am. J., 79, 9-19.

Moraes, M. T. de., Silva, V. R. da., Zwirtes, A. L., Carlesso, R. (2014). Use of penetrometers in agriculture: a review, *engenharia agrícola 34*(1), 179-193.

Morales, C.J, Caicedo, J. C., Velandia F. A., y Nuñes, A. (2001). *Geología de la plancha 345 Campoalegre*. Colombia: Instituto de Investigación E Información Geocientífica Minero-Ambiental y Nuclear Ingeominas.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación. (2004). Desarrollo de la siembra directa en Brasil Tropical (147). Recuperado de http://www.fao.org/docrep/007/y2638s/y2638s00.htm#Contents

Otto, R.; Silva, A.P.; Franco, H.C.J.; Oliveira, E.C.A.; Trivelin, P.C.O. (2011). High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. Soil and Tillage Research, 117,201-210.

Pabin, J., Lipiec, J., Wlodek, S., Biskupsky, A., y Kaus, A. (1998). Critical soil bulk density and strength for pea root growth as related to other soil factors. *Soil and tillage Research, 43*, 206-208.

PACKER, I. J., HAMILTON, G. J., KOEN, T. (1992). Runoff, soil loss and soil physical property changes of light textured soils from long term tillage treatments. AmJ. Soil Res, 30, 789-806.

Pagliai, M., Vignozzi, N., and Pellegrini, S. (2004). Soil structure and the effect of management practices. Soil and Tillage Research, 79 (2), 131-143.

Pandey, D., Agrawal, M., y Bohra, J. S. (2014). Effects of conventional tillage and no tillage permutations on extracellular soil enzyme activities and microbial biomass under rice cultivation. Soil and Tillage Research, 136, 51-60.

Perumpral, J. (1987). Cone penetrometer applications - a review. Transactions of the ASAE, 30, 934-944

Pinot, R. H. (2001). *Manual de Edafología*. Chile: Alfaomega grupo editor.

Pinzón, A. y Amézquita, E. 1991. Compactación de suelos por el pisoteo de animales en pastoreo en el piedemonte amazónico de Colombia. Pasturas Tropicales 13(2):21 - 26.

Pinzón, L., Álvarez, J. y Mesa, A. (2016) Estudio de la variabilidad espacial de humedad y compactación en suelos con diferentes cubiertas Vegetales, Agronomía colombiana, 34(3), 355-363

Pizarro, F., (1978), Drenaje agrícola y recuperación de suelos salinos, Madrid, España: editora agrícola española.

Porta, J., López, M. y Roquero, C. (1999). Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.

Ramírez, R. (2016). Fertilidad integral del suelo. En A. Torrente. (Ed), Actualización en fertilidad del suelo. (pp. 41-56). Bogotá, Colombia: Sociedad colombiana de la ciencia del suelo, Universidad Sur colombiana

Ramírez, R., Taboada, M. A., Gil. R., (2006). Efectos a largo plazo de la labranza convencional y la siembra directa sobre las propiedades físicas de un argiudol típico de la pampa ondulada argentina. *Rev. Fac. Nac. Agron. Medellin*, *59*(1), 3237-3256.

Raviv, M., Heinrich, J. (2007). Soilless cultura theory and practice, Elsevier, Department of Environmental Horticulture, Israel.

Rojas, J. M. (2012). Inta gob ar: Indicadores físicos de calidad de suelos: densidad aparente. Chaco, Argentina, recuperado de https://inta.gob.ar/sites/default/files/script- tmp-inta-_densidad_aparente.pdf

Rubio, A. (2010). La densidad aparente en suelos forestales del parque natural los alcornocales (tesis pregrado). Universidad de Sevilla, España

Russell, E. W. (1977). Soil conditions and plant growth. 10 th, edition. Logman, Nueva York, 849 p.

S.D. Logsdon, D.L. Karlen. (2004). Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage, *Soil Tillage Res, 78*, 143-149.

Schneider, F., Don, A., Hennings, I., Schmittmann, O., y Seidel. (2017). The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know?, Soil and Tillage Research, 174, 193-204.

Sepúlveda R. (2009) La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo

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.

Silva, V.R.; Reichert, J.M.; Reinert, D.J. (2004). Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. Ciência Rural, 34 (2), 399-406.

Silva, V.R.; Reichert, J.M.; Reinert, D.J. Soares, J.M. (2002). Factores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho Distrófico típico. I - estado inicial de compactação. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 26 (1), 1-8

Sivarajan, S., Maharlooooei, M., Bajwa, S y Nowatzki, J. (2018). Impact of soil compaction due to wheel traffic on corn and soybean growth, development and yield. Soil and Tillage Research, 175, 234-243.

Soane, B., Blackwell, P., Dickson, J. y Painter, D., (1981).Compaction by agricultural vehicles: a review. 1. Soil and wheel characteristics. Soil Till Res, 1(1):207 - 237.

Soil Science Society of America. (2018), Glossary of Soil Science Terms, Madison, WI. Recuperado de https://www.soils.org/publications/soils-glossary#

Tenza, J. (2016) Estudio de las propiedades mecánicas de suelos agrícolas a partir de pruebas in situ y de laboratorio para modelos de labranza y tracción. (Tesis de maestría). Universidad nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

USDA. (1993). Soil Survey Manual Introduction. United States Department of Agriculture. Retrieved from http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_050993.pdf

Valdés N., Gonzales L. y Will A. (2011). Estimación de la resistencia a la penetración de suelos usando redes neuronales artificiales, Acta Agronómica, 60(3), 252-262

Vallejos, A., Kees, M., Bondia, P., Echeverria, N., Silenzi, J., Zajac, C., y Lucia, M. de. (2014). Subsolado En Siembra Directa: Efectos Sobre Parámetros Físicos Del Suelo y El Rendimiento De Soja. Ciencia del suelo, 32 (2), 291-300.

Vaz, C.M.P., Manieri, J.M., De Maria, I.C., Tuller, M. (2011). Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content, Geoderma, 166 (1), 92-101

Veronese, J., Carvalho, M., Dafonte, J., Freddi, O., Vidal, E. y Ingaramo, O. (2006). Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian Ferralsol. Soil Till Res, 85(1-2). 166 - 177.

White, R., Kirkegaard, J. (2010). The distribution and abundance of wheat roots in a dense, structured subsoil: implications for water uptake, Plant Cell Environ., 33, 133-148.

Wu, X., Tang, Y., Li, C. McHugh, A., Li, Z. y Wu, C. (2018). Individual and combined effects of soil waterlogging and compaction on physiological characteristics of wheat in southwestern China. Field Crops Research, 215, 163-172.