

**FACULTAD DE CIENCIAS
NATURALES Y AGROPECUARIAS**

**Trabajo de Diploma en opción al título de
Ingeniero Agrónomo**

**COMPORTAMIENTO HIDROPEDOLÓGICO DE UN
VERTISOL CRÓMICO BAJO DIFERENTES USOS
DE LA TIERRA**

Autor: José Alberto Zaragoza Chávez

Tutor: MsC. Juan Alejandro Villazón Gómez

Curso: 2020- 2021

Pensamiento

“La agricultura, para un hombre honorable y de alto espíritu, es la mejor de todas las ocupaciones y artes por medio de las cuales un hombre puede procurarse el sustento”. Chatfield

Agradecimientos:

A Dios que sabrá recompensar a todos y cada uno de los que participaron para bien o para mal en mi carrera hasta el día de hoy

En especial a mi querido abuelo que la covid 19 me arrebató y que me ve desde el cielo, espero que estés orgulloso de mi nunca, voy a olvidarte

Resumen

Los Vertisoles ocupan extensas áreas a nivel mundial. En Cuba, se encuentran distribuidos a lo largo de casi todo su territorio. Sus factores edáficos limitantes son fundamentalmente, de carácter físico. Por lo que el estudio de su hidropedología, apoyado en técnicas multivariadas para una visión más integral, es de vital importancia. El trabajo se desarrolló en el año 2019, con el objetivo de determinar, mediante análisis multivariado, el comportamiento hidropedológico de un Vertisol Crómico bajo diferentes usos de la tierra. En áreas bajo pasto natural, caña de azúcar y bosque secundario, pertenecientes a la Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar de Holguín, se escogieron tres puntos al azar en cada una. Se determinó la resistencia a la penetración, la densidad aparente, la humedad gravimétrica y la humedad volumétrica a las profundidades de 0-10, 10-20 y 20-30 cm. Se realizó un Análisis de Componentes Principales y otro de Correlaciones Canónicas, Se utilizaron los softwares Statistica 7 y Statgraphics Plus XV. II. Se encontró que las dos primeras componentes realizaron la mayor contribución a la varianza, con un 83.09% de la varianza total. Los mayores aportes (1^{ra} componente) a la varianza total estuvieron dados por la humedad en todas las profundidades y por la compactación del suelo en la profundidad de 20-30 cm. La 2^{da} componente estuvo influenciada por la compactación del suelo en las capas de 0-10 y de 10-20 cm de profundidad. Existió contraposición, en todas las profundidades, entre las variables que caracterizan el estado de la fase sólida con las que describen la fase líquida del suelo. Existió correlación entre la humedad del suelo y la compactación. Los dos primeros pares de variables canónicas mostraron una fuerte correlación lineal y dispersada regularmente a lo largo de los valores centrales del modelo, con un notable agrupamiento por profundidades.

Palabras clave: Densidad aparente, Resistencia a la penetración, humedad del suelo.

Abstract

Vertisols occupy extensive worldwide areas. In Cuba, they find themselves distributed through almost all your territory. Your bordering edaphic factors are fundamentally, of physical character. For what the study of your hidropedología, backed up in multivariate techniques for a most comprehensive vision, it is vitally important. The work was carried out in 2019, with the objective of determining, through multivariate analysis, the hidropedological behavior of a Chromatic Vertisol under different land uses. In areas under natural grass, sugarcane and secondary forest, belonging to the Holguín Sugarcane Provincial Research Station, three random points were chosen in each. The penetration resistance, bulk density, gravimetric humidity and volumetric humidity at depths of 0-10, 10-20 and 20-30 cm were determined. An Analysis of Main Components and another of Canonical Correlations was performed, Statistica 7 and Statgraphics Plus XV.II software were used. It was found that the first two components made the greatest contribution to the variance, with 83.09% of the total variance. The greatest contributions (1st component) to the total variance were given by the humidity in all the depths and by the compaction of the soil in the depth of 20-30 cm. The 2nd component was influenced by soil compaction in the 0-10 and 10-20 cm deep layers. There was a contrast, at all depths, between the variables that characterize the state of the solid phase with which they describe the liquid phase of the soil. There was a correlation between soil moisture and compaction. The first two pairs of canonical variables showed a strong linear correlation and regularly dispersed along the central values of the model, with a remarkable grouping by depths.

Keywords: Soil bulk density, Soil penetration resistance, Soil moisture.

ÍNDICE

Contenido

I.- INTRODUCCIÓN.....	1
Problema científico.....	2
Hipótesis.....	2
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
II.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	3
1.- Suelos Vérticos.....	3
Factores formadores.....	4
Procesos formadores.....	4
Características hidropedológicas de los Vertisuelos.....	5
Clasificaciones de los Vertisoles.....	5
Distribución y extensión.....	6
Principales usos.....	7
Caña de azúcar.....	8
Arroz.....	9
Factores limitantes.....	9
Compactación.....	10
Resistencia a la penetración.....	12
El agua en el suelo.....	13
Humedad gravimétrica.....	14
Estructura.....	15
Textura.....	15
Densidad aparente.....	16
Porosidad.....	17
La materia orgánica en el suelo.....	19
III.- MATERIALES Y MÉTODOS.....	20
IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	22
V.- CONCLUSIONES.....	28
VI.- BIBLIOGRAFÍA.....	29

I.- INTRODUCCIÓN

Los Vertisoles ocupan, a nivel mundial, una superficie de 335 millones de ha, generalmente en las zonas tropicales semiáridas, con precipitaciones anuales que oscilan entre los 500-1 000 mm. Grandes extensiones se mantienen en desuso o solo se dedican a usos extensivos (ganadería, al corte de madera, quema de carbón o labores similares) o van desde minifundios que producen cultivos después de la temporada de lluvias hasta agricultura bajo riego a pequeña y gran escala (IUSS Working Group WRB, 2015). En Cuba abarcan una superficie de unas 695 000 ha (Hernández *et al.*, 2014). Están dedicados intensivamente al cultivo de la caña de azúcar y del arroz. La producción ganadera ocupa el 50% de la superficie agrícola (Cid *et al.*, 2016).

Estos suelos se caracterizan por presentar una capa de 25 cm o más de espesor, en los primeros 100 cm de profundidad, con caras de deslizamiento (*slickensides*) o agregados en forma de cuña inclinados longitudinalmente entre 10-60° con respecto a la horizontal. Un 30% o más de arcillas en la fracción de tierra fina en la capa de 0-18 cm de profundidad o en el horizonte Ap y grietas que se abren y se cierran periódicamente (Soil Survey Staff, 2010).

Tienen la peculiaridad de que, cuando ceden o absorben agua, el volumen aparente de los mismos se modifica, con la consiguiente reorganización del material (Cid *et al.*, 2004a). De esta manera, la densidad aparente del suelo constituye un indicador de cómo las propiedades físicas afectan la dinámica del agua en el suelo, su disponibilidad y aprovechamiento por parte de las plantas (Yang *et al.*, 2016).

El suelo es un sistema compuesto por tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La disposición de la fase sólida o matriz del suelo determina la geometría del espacio poroso en el que funcionan el agua y el aire (Cid *et al.*, 2004b). Por lo que resulta importante, a la hora de conocer el ambiente biofísico en el que ocurre el desarrollo radicular de las plantas, realizar la caracterización física del suelo (Batey, 2009); actividad muy compleja, como todos aquellos estudios destinados a agrupar

propiedades que delimitan un determinado comportamiento del funcionamiento del suelo (Cid *et al.*, 2004b).

Con el cambio de uso de la tierra, la primera modificación de un ecosistema natural, es la compactación (Torres *et al.*, 2016). La compactación del suelo provoca el incremento de la densidad mecánica, destruye y debilita su estructura, por lo que hace disminuir la porosidad de aireación del suelo. Sus efectos se vierten en un menor desarrollo del sistema radicular de las plantas y, por lo tanto, un menor desarrollo vegetativo y menoscabo de los rendimientos agrícolas (Gutiérrez *et al.*, 2014).

De esta manera, el concepto de fertilidad física, resulta inseparable de la fertilidad general del suelo (Cid *et al.*, 2006) y, a la hora de evaluar los cambios en la calidad física de los suelos, el uso de la estadística multivariada permite una mejor percepción e interpretación de las interacciones entre las variables involucradas (Mota *et al.*, 2014). Además, en los últimos años, la hidropedología se ha constituido como una ciencia multidisciplinaria que integra los campos de investigación correspondientes a la pedología y a la hidrología (Lin *et al.*, 2006).

Problema científico

¿Cómo influye el uso de la tierra sobre las propiedades hidropedológicas en un Vertisol crómico en áreas de la Empresa Agropecuaria Guatemala?

Hipótesis

Los diferentes usos de la tierra influyen sobre las propiedades hidropedológicas de un Vertisol Crómico en áreas de la Empresa Agropecuaria Guatemala

Objetivo general

Determinar, mediante análisis multivariado, el comportamiento hidropedológico de un Vertisol Crómico bajo diferentes usos de la tierra

Objetivos específicos.

- Determinar las propiedades hidropedológicas en cada una de las coberturas vegetales.

- Determinar los cambios en profundidad que provocan las coberturas vegetales sobre las propiedades hidropedológicas.

II.- REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.- Suelos Vérticos

El nombre Vertisol deriva del latín vertex que significa mezclado. Son suelos que presentan un 30% o más de arcilla en todos los horizontes hasta una profundidad de 50 cm, caras de deslizamiento, agregados en forma de cuña y grietas que se abren y se cierran periódicamente. El contenido de arcilla puede ser hasta del 90%, en particular para Vertisoles que se originan de depósitos piroclásticos. Además, estos tienen cambios pronunciados en el volumen con la variación del contenido de humedad y evidencias de movimiento del suelo en las caras de deslizamiento (WRB, 2006).

Se caracterizan por formarse a partir de sedimentos arcillosos ricos en esmécticas, con un espesor considerable (igual o mayor de 60 cm) y están bajo el proceso de Vertisolización, que da lugar a un horizonte principal de diagnóstico Vértico. Las características que distinguen a estos suelos son el espesor arcilloso, plasticidad, el color oscuro, la formación de bloques prismáticos mayores de 15 cm con caras de deslizamiento, además de la presencia de grietas y microrrelieve gilgai (Hernández et al., 2015).

Las condiciones ambientales que conducen a la formación de un horizonte vértico o propiedades vérticas son aquellas donde ocurre precipitación suficiente para permitir el intemperismo de los materiales parentales, pero no tan alta como para producir lixiviación de bases; además de periodos secos, drenaje restringido y altas temperaturas (Torres et al., 2016).

Son suelos sialíticos con relaciones moleculares $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$ del orden de 4 y con predominio del Mg sobre el Ca, tanto en la masa de suelo como en la fracción arcillosa. Los suelos están saturados en bases y el pH tiende a ser generalmente neutro ó alcalino. Entre los cationes cambiables, en ocasiones, el magnesio iguala o supera al calcio, sobre todo en los horizontes inferiores de los suelos que toleraron con mayor intensidad el proceso de gleyzación. Durante el proceso de formación, la materia

orgánica se acumula (aunque en cantidades no muy altas), pero penetra por las grietas generalmente a bastante profundidad. Esta materia orgánica se une muy estrechamente con la arcilla (complejo arcillo-húmico), dando una tonalidad entre gris oscura y negra a todo el perfil en los casos más representativos de este fenómeno, aunque en ocasiones puede ser pardo oscuro. La relación H/F es mayor que 2, y puede llegar hasta 4 en el horizonte con propiedades vérticas más desarrolladas, el porcentaje de huminas es de 35-40% y la relación C/N es de 13-20 (Corella et al., 2002).

Factores formadores

El factor formador que más influye en el desarrollo de este suelo es el clima. De la combinación de la temperatura y la precipitación se producirán esos períodos de desecación-humedecimiento que definen a los Vertisoles y que se dan en cualquier latitud del planeta. Por otro lado, la vegetación es otro factor que se ve claramente limitada por los Vertisoles puesto que deben de estar adaptadas a la posibilidad de que las raíces sufran tensiones en la humectación-desecación de las arcillas. Respecto al relieve y al material parental, señalar que los vertisoles se desarrollan en a dos niveles: macrotopográfico (desarrollados en pendientes menores al 5%) y microtopográfico, con la presencia de estructuras gil-gai. En cuanto al tiempo como factor formador, podríamos señalar que se dan sobre suelos jóvenes, pero con material parental procedente de superficies geomorfológicas antiguas.

Procesos formadores

La combinación de factores formadores y procesos formadores, darán lugar a los posibles horizontes superficiales y subsuperficiales que pueden encontrarse en suelos clasificados como Vertisoles. La génesis de los Vertisoles está íntimamente relacionada con el elevado contenido de arcilla (mayor del 30%), el predominio de minerales arcillosos del tipo 2:1 (arcillas expandibles) y los cambios de humedad motivados por la alternancia de periodos lluviosos y secos. En estas condiciones, el principal proceso formador que se produce es el de la haploidización por argilo-pedoturbación, que consiste en una mezcla del material que produce la imposibilidad de una diferenciación de horizontes. Durante el período seco, se forman las grietas que poco a poco se van rellenando por la erosión natural. Ahora bien, cuando se produce una lluvia copiosa

estas partículas que han caído dentro se hinchan y dan lugar a veces a la aparición del microrrelieve en forma de gilgai. En este sentido la pedoturbación es un proceso que homogeniza el perfil del suelo debido al llenado de las grietas con material superficial durante la estación seca.

Características hidropedológicas de los Vertisuelos

La naturaleza de la relación agua-suelo en los Vertisuelos tiene un efecto notable en el manejo del agua en los mismos, particularmente cuando son irrigados. El efecto de las grietas en la infiltración y la aireación, los cambios en la densidad aparente con el contenido de agua y el efecto del potencial de sobre presión en la humedad característica del suelo deben valorarse de conjunto para una adecuada gestión del agua (Bridge y Ross, 1984).

Clasificaciones de los Vertisoles

Dentro del agrupamiento de los Vertisoles, se encuentran dos tipos genéticos según (Hernández *et al.*, 2015):

Vertisol Crómico:

En este tipo de suelos se incluyen aquellos Vertisoles que presentan colores con chroma mayor de 2, por lo que se encuentran en regiones donde hay sedimentos que provienen de regiones con suelos que tienen alto contenido en hierro. Se caracterizan al igual que el tipo de suelos anterior por tener un horizonte vértico de estructura de bloques prismáticos con caras de deslizamientos, pero con chroma y value mayor de 2.

Los Subtipos encontrados se fundamentan en la humificación, presencia de horizonte cálcico, del horizonte nodular ferruginoso y de propiedades gléyicas por debajo de 50 cm de profundidad. Cuando tenemos en cuenta el lavado de los carbonatos, la sodicidad y salinidad, se establecen los Géneros de suelos. Los suelos clasificados son:

Tabla 1. Agrupamiento de Vertisoles del tipo genético Crómico.

Tipo genético de suelos	Subtipos de suelos	de Géneros de suelos	Perfiles diagnóstico
Vertisol Crómico (VC)	VC húmico y cálcico	VC húmico y cálcico, carbonatado	Ahcak-B 1 vcak-B 2 v-cak-BCcak-Ccak
	VC húmico húmico, con	VC material nodular ferruginoso, carbonatado	Ahk-ABk-B 1 vk-B 2 vnfk-BCnfk-Cnfk
	VC cálcico	VC cálcico, carbonatado	Acak-B 1 vcak-B 2 v-cak-B Ccak-Ccka; o A 11 k-A 12 k-B 1 vk-B 2 vk- B 3 vcak-Ccak
	VC cálcico y gléyico	VC cálcico gléyico, medianamente lavado	A-B 1 v-B 2 vk-B 3 vgcak

Vertisol Pélico:

Son de perfil AC, ABC, ACg o ABCg. Dentro de este Tipo se separan Subtipos por el color oscuro, presencia de horizonte mullido, por la humificación, presencia de horizonte cálcico, de la gleyzación, de características estágnicas y la influencia del cultivo en el cambio de las propiedades del suelo (evolución agrogénica).

Distribución y extensión

A nivel mundial se considera que los Vertisoles cubren 335 millones de hectáreas y se presentan principalmente en los trópicos semiáridos, con una precipitación media anual de 500-1000 mm, pero también se encuentran en los trópicos húmedos (Torres *et al.*, 2016).

Los vertisoles son suelos que se desarrollan en climas tropicales y subtropicales en los cuales las diferencias de precipitación y temperatura son bastante destacables entre la estación seca y húmeda. Aparecen grandes extensiones en la India, África Central, este de Australia, Uruguay, México y Texas.

En Cuba estos suelos fueron diagnosticados inicialmente como Negros Tropicales (Hernández *et al.*,1971).

posteriormente como Vertisoles (Instituto de Suelos.1975), manteniéndose este nombre en la nueva versión de clasificación genética de los suelos (Hernández *et al.*, 1999).

Por esta última versión de clasificación de los suelos de Cuba, los Vertisoles se diagnostican por la presencia de un horizonte vértico, el cual presenta las siguientes características:

- Un espesor de al menos 60 cm dentro de una capa de 150 cm medida desde la superficie.
- Puede presentarse desde la superficie al ocurrir la manifestación de microrrelieve gilgai o estar recubierto por un horizonte mullido.
- Textura arcillosa en todo su espesor, con contenido de arcilla mayor de 40 %.
- Estructura en bloques prismáticos (grandes o medianos) a masivos, con caras brillantes bien manifiestas que recubren los agregados.
- En estado húmedo es plástico y en estado seco es duro y se agrieta.
- Alta capacidad de cambio de bases, con predominio en ocasiones del magnesio sobre el calcio dentro del complejo de intercambio.
- Predominio de minerales arcillosos del tipo de las esmectitas.

Los Vertisoles ocupan una extensión en nuestro país de 695 000 ha, presentándose en casi todas las provincias de Cuba, siendo la de mayor extensión la provincia de Granma donde ocupan un área de 228 000 ha; siendo las de menor extensión Pinar del Río (700 ha), Matanzas (12 500 ha) y la antigua provincia Habana (14 100 ha). Como se puede observar en las provincias occidentales donde predominan suelos muy evolucionados (Alíticos y Ferrálicos), no hay una manifestación extensiva de estos suelos, y solamente hace poco tiempo se presentó las características de un perfil de este suelo (López, *et al* 2010,)

Principales usos

Los Vertisoles presentan generalmente una vegetación herbácea bastante desarrollada, aunque su manejo es complicado debido a los movimientos del suelo. Es por ello que

se desenvuelve bien una vegetación herbácea con pocas raíces y a poder ser vegetación estacional. En cambio, árboles, vallados, cercas se inclinan, los cimientos de las construcciones y los pavimentos se desplazan y se agrietan con facilidad, las tuberías se rompen, por lo que construir en zonas con suelos verticos suele causar problemas si no se gestiona bien.

Estos suelos son usados intensivamente para la producción de caña de azúcar (en regadío y secano), arroz (de regadío) y otros cultivos en menor escala. La producción ganadera mediante la siembra de pastos mejorados con riego o pastizales naturales en secano conforma casi el 50% del uso de estos suelos (Cid *et al.*, 2009).

Aunque muchas de estas áreas están dedicadas al cultivo de la caña de azúcar y pastos o forrajes, el 13% de ellas se siembran de cultivos dedicados al consumo humano directo (arroz, frijoles, hortalizas, maíz, etc.) y las mismas dejan de producir (en un año de lluvias normales) alrededor de 633 209 t de alimento (Cid *et al.*, 2005).

Caña de azúcar

En nuestro país una gran parte de los cultivos de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) se encuentran en zonas donde predominan los suelos verticos y son numerosas las investigaciones sobre el comportamiento de estos y su influencia en las características físicas.

La Densidad aparente (D_a) en periodos de hasta 30 años muestra que no hubo diferencias significativas en los diferentes años de cultivo en suelo Vertisol con monocultivo de caña de azúcar (Martha *et al.*, 2003)

Los cambios en las propiedades del suelo Vertisol son importantes cuando está ocupado por el cultivo de la caña de azúcar. Una menor variación en las propiedades de los suelos cañeros es observada a través de los años de cultivo. Los contenidos de MO y Nt disminuyen del suelo, mientras que el pH, P, K y CIC se mantienen a través de los años de monocultivo. El Ca, Mg y Na mostraron una tendencia a disminuir su contenido con el tiempo bajo cultivo con caña, pero manteniéndose en niveles adecuados para el buen desarrollo del cultivo. La textura y la D_a no se modificaron bajo las condiciones de este estudio. Así el monocultivo de caña de azúcar ha afectado principalmente las características químicas de los suelos bajo estudio, particularmente

MO y Nt. Esta degradación parece estar asociada a las prácticas de cosecha que se efectúan al cultivo, más que a las labores culturales del mismo (Martha *et al.*, 2003).

Arroz

Los Vertisoles son especialmente buenos para el cultivo del arroz (*Oriza Sativa*) debido a su impermeabilidad cuando se saturan. La agricultura de secano es muy dificultosa debido a que solo pueden trabajarse en un rango de humedad muy estrecho: son extremadamente duros en seco, y demasiado plásticos en húmedo. Los Vertisoles son susceptibles a la compactación cuando las operaciones de campo son realizadas con altos contenidos de agua en el suelo (Potter y Gerik, 2001).

En particular, la cosecha de arroz se realiza bajo condiciones de inundación o en estado de saturación del perfil, con cosechadoras muy pesadas y tránsito de tractores que arrastran carros tolveros. Se produce un importante huelleado, en muchos casos muy profundos. La huella dejada por la cosechadora cuando se desplaza en suelo poco húmedo realiza presión sobre el suelo sin alcanzar el amasado del mismo, y la densificación subsuperficial no es tan marcada como en el caso del tránsito con suelo saturado donde las ruedas de la maquinaria realizan amasado en el suelo, existiendo compactación por debajo de la huella que puede llegar hasta más allá de los 35 cm. Se produce desplazamiento lateral del material sobre la superficie, provocando una importante densificación (Pozzolo *et al.*, 2001).

Factores limitantes

El problema de la degradación de tierras agrícolas a nivel mundial, clama por el desarrollo de nuevas tecnologías y sistemas de cultivo que conduzcan a una agricultura sostenible asentada en suelos sostenibles (Amézquita, 1998b). La FAO (1990) indica que del total de 1475 millones de hectáreas que son utilizadas en agricultura (cultivos permanentes y cultivos anuales), 553 millones de hectáreas se encuentran degradadas por intervención humana, lo cual equivale a que cerca del 37% del área intervenida por el hombre tiene algún problema de degradación.

En Cuba la gran mayoría de las áreas afectadas por mal drenaje y salinidad coinciden con las zonas donde abundan los Vertisuelos. Las áreas con suelos afectados por el

mal drenaje en Cubase estiman en 2,7 millones de ha a lo que hay que agregar más de 1 000000 de ha afectadas por la salinización (CITMA, 2007).

Según Hubble (1973), citado por Cid *et al.* (2016); ha reseñado los factores limitantes de estos suelos del modo siguiente:

- I. Muy reducida permeabilidad en estado de dilatación, en el cual tanto la infiltración como el drenaje interno es muy reducido.
- II. Pobre aeración del suelo húmedo y desarrollo radicular retardado.
- III. Estrecho rango de humedad para las operaciones de laboreo y siembra.
- IV. Dificultades en la germinación y la emergencia de las plántulas asociadas al rápido secado de la superficie ya la formación de costras en algunos tipos de suelos.
- V. Una superficie desigual que requiere alisamiento (especialmente cuando tiene Gilgai) y mejora de la pendiente para el riego superficial.
- VI. Riesgo de salinización asociado tanto a la ascensión del nivel freático como al uso de agua de riego de calidad dudosa.

Compactación

La compactación de suelos agrícolas tiene serios impactos económicos y ecológicos y es uno de los mayores problemas que enfrenta la agricultura mundial (Soane y Ovwerkerk, 1994). Sin embargo, el impacto económico de la compactación es difícil de cuantificar puesto que siempre aparece interactuando con otros factores que afectan procesos importantes en los suelos (Voorhees, 1987). El impedimento mecánico debido a la compactación y a la presencia de capas endurecidas (adensadas), es la principal causa de disminución de los rendimientos y de la insostenibilidad de los suelos tropicales, debido a los efectos negativos que causan en el crecimiento de las raíces (Amézquita, 1998).

Se conoce como compactación al proceso de aumento de la densidad aparente del suelo, como respuesta a la aplicación de una fuerza externa (Bowen, 1981). El aumento

en la densidad aparente es función de la fuerza aplicada y del contenido de humedad del suelo (Amézquita *et al.*, 1997).

Braford y Gupta (1986) describen a la compactación como la compresión de suelos no saturados. Durante este proceso hay expulsión de aire del suelo. Consolidación, se refiere a la compresión de suelos saturados, durante ella, hay expulsión de agua de los poros del suelo.

Adensamiento, es el reempaquetamiento de microagregados y de partículas del suelo y es causada por la pérdida de estructura como consecuencia del uso excesivo de implementos agrícolas en las labores de preparación del suelo.

El suelo pierde su volumen cuando se le aplica una carga superior a la resistencia que su conformación estructural opone a esa presión (Amézquita *et al.*, 1997). Cuando a un suelo se le aplica una presión capaz de producir un cambio en su volumen hay cuatro factores posibles a los cuales se les puede atribuir dicho cambio (Harris, 1971):

- a) Compresión de las partículas sólidas
- b) Compresión del líquido y del gas contenido dentro de los espacios porosos
- c) Cambio en el contenido del líquido y del gas que ocupan los espacios porosos
- d) Reacomodamiento de las partículas del suelo

Como causas de compactación pueden citarse las siguientes (Chancellor, 1977):

- I. Consolidación natural del suelo durante el proceso de formación
- II. Pisoteo por animales, incluido el hombre
- III. Contracción de suelos debido a secamiento
- IV. Deformaciones causadas por las llantas de tractores y por implementos agrícolas
- V. Impacto de gotas de agua lluvia, riego por aspersión y riego por inundación.

Como consecuencia de la deformación y de la ruptura de agregados a que es sometido el suelo durante las labores de preparación, la compactación está siempre acompañada de la pérdida de volumen de poros especialmente de los más grandes. Esto causa pérdida en la permeabilidad al aire, en el flujo de agua y de iones, y restricciones en el

crecimiento de las raíces. Los cambios negativos en la porosidad total del suelo y en la distribución del tamaño de los poros, causan cambios en los procesos de interceptación, flujo de masa y difusión, por los cuales se nutren las plantas, los cuales se suceden fundamentalmente por macro, meso y microporos respectivamente (Amézquita, 1994a).

La compactación está también asociada a la baja estabilidad estructural del suelo frente al agua (Gavande, 1982), lo cual causa el adensamiento. Un suelo con estructura débil aumenta su cohesión entre partículas, disminuyendo la independencia de cada agregado y microagregados, con lo cual se reduce el espacio poroso y se hace más susceptible a la compactación o adensamiento.

Los suelos que tienen una mayor tendencia a compactarse presentan generalmente texturas medias a gruesas. Se ha comprobado que en suelos de texturas medias a gruesas cuando se aplican presiones altas se logra obtener valores más altos de densidad aparente, que en suelos de texturas arcillosas, especialmente cuando los contenidos de limo y/o arena fina son abundantes. El efecto de la compactación en la reducción de la aireación se hace más crítico en suelos de texturas medias a finas, que en suelos de texturas gruesas, los cuales tienen más macroporos que los suelos de textura fina (Pla, 1977).

Otros factores que influyen en la compactación de los suelos son: bajos contenidos de materia orgánica, suelos desprotegidos, altas concentraciones de sodio y de otros agentes dispersantes, historia antecedente de la humedad del suelo (Lal, 1996), el manejo de los suelos, los sistemas de cultivo y las condiciones climáticas (Voorhees, 1987).

Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración es un parámetro directamente relacionado con la compactación, que es resultado del aumento en densidad y disminución de la porosidad lo que implica un deterioro de la estructura que limita el crecimiento de las plantas y el rendimiento del cultivo (Campos *et al.*, 2015).

Se ha utilizado en muchos ensayos de compactación, se basa en el corte del suelo a lo largo de una superficie, determinada por la geometría del aparato o bien en ensayos de

penetración, que resultan más fáciles de realizar. El penetrómetro registra lecturas a medida que profundiza en el suelo, por ello el resultado es un conjunto de medidas de resistencia para cada profundidad, expresada como fuerza por unidad de área en kilopascal (KPa) o megapascal (MPa) (Toledo y Millán, 2016).

Para medir la resistencia a la penetración se deben de tener en cuenta el contenido de humedad, la velocidad de secado, el manejo y las propiedades intrínsecas del suelo. Según Ellies y MacDonal (1988) las pérdidas de agua originan un acercamiento entre las partículas del suelo, el cual será mayor cuando más lento es el secado, y consecuentemente se aumenta la resistencia mecánica a la penetración (Valdés *et al.*, 2011).

El agua en el suelo

El contenido de agua en el suelo puede ser expresado, según Rucks *et al.* (2004), en valores gravimétricos o volumétricos; el primero de ellos constituye la vía de determinación más sencilla. Ambas magnitudes son expresadas como porcentajes (Jaramillo, 2002).

El agua en el suelo se mueve mediante la infiltración al penetrar en dirección vertical, oblicua, o paralela a la superficie en el sentido de la pendiente, según las características del suelo. La magnitud y la velocidad de este movimiento están condicionadas por la permeabilidad del suelo, que a su vez depende de la porosidad, la estructura y el grado de humedad. Una vez infiltrada el agua, y antes de que ocurran los procesos de absorción radicular y evaporación, comienza la redistribución de la misma. Cuando el suelo está aún saturado, el agua de los macroporos circula con rapidez y se pierde por drenaje (Jordan, 2006).

Al alcanzar la capacidad de campo el agua circula por los mesoporos y microporos, de manera más lenta, pues está retenida por fuerzas capilares. Una vez que el agua se ha redistribuido, comienza el proceso de desecación debido al consumo realizado por las plantas y a la evaporación (Jordan, 2006).

La humedad de un suelo agrícola sigue un ciclo entre un límite superior de la capacidad de campo y un límite inferior del punto de marchitez según el clima (balance hídrico) y el riego (Forsythe, 1997).

El agua contenida en el suelo influye de forma decisiva en el comportamiento productivo de los cultivos. Las necesidades hídricas de las plantas varían con la especie y la etapa vegetativa en la que se encuentran. Es importante conocer la disponibilidad de agua en el suelo en términos de masa y de volumen para poder entender la influencia de muchas de las propiedades químicas, mecánicas e hidrológicas sobre las plantas. Dicha disponibilidad suele encontrarse, en el espacio poroso total, en cantidades variables (Salgado, 2001).

El contenido de agua en el suelo según los estudios realizados a las propiedades hidrofísicas de los suelos demuestra que la tensión con la que el agua es retenida cambia paulatinamente con el aumento o la disminución de la humedad. El agua se encuentra retenida en varias formas las que pueden ser el agua gravitacional o libre, agua capilar, agua higroscópica, agua molecular y el agua de combinación o de constitución (Cairo y Fundora, 2005).

También ha sido clasificada desde el punto de vista de su aprovechamiento por las plantas de forma biológica por Aguilera y Martínez (1996) en:

- I. Agua de gravitación. Es la que drena por gravedad de la zona de las raíces. El movimiento del agua es más rápido en los suelos de textura arenosa que en los arcillosos.
- II. Agua disponible o humedad aprovechable. Es la que puede ser aprovechada por las plantas; se encuentra entre la humedad a la capacidad de campo y la del punto de marchitez permanente.
- III. Agua no disponible. Es la que se encuentra retenida por la acción de la fuerza capilar, lo que trae como resultado que su aprovechamiento sea muy difícil.

Humedad gravimétrica

El conocimiento del contenido de humedad del suelo, en el primer horizonte posee gran importancia en la evaluación de la respuesta hidrológica de la reserva de agua, en particular la forma de humedecimiento de las diferentes capas a partir de las direcciones preferenciales que sigue el agua en el suelo, también es esencial para

controlar las diferentes formas de riego y conocer la influencia de la lluvia en el clima de una región y en las variaciones de los flujos de calor (Brocca *et al.*, 2012).

Estructura

La compactación está también asociada a la baja estabilidad estructural del suelo frente al agua, lo cual causa el adensamiento. Un suelo con estructura débil aumenta su cohesión entre partículas, lo que disminuye la independencia de cada agregado y microagregados, con lo cual se reduce el espacio poroso y se hace más susceptible a la compactación o adensamiento (Gavande, 1982).

Cuando a un suelo se le aplica una presión capaz de producir un cambio en su volumen hay cuatro factores posibles a los cuales se les puede atribuir dicho cambio (Harris, 1971):

- Compresión de las partículas sólidas
- Compresión del líquido y del gas contenido dentro de los espacios porosos
- Cambio en el contenido del líquido y del gas que ocupan los espacios porosos
- Reacomodamiento de las partículas del suelo

La consistencia del suelo es el término que designa las manifestaciones de las fuerzas físicas de cohesión y adhesión, procede dentro del suelo a varios contenidos de humedad. A bajo contenido de humedad el suelo es duro y muy coherente a causa del efecto de cementación entre partículas secas. Si el suelo es trabajado con estas condiciones se producen terrones. Cuando el contenido de humedad aumenta, son adsorbidas moléculas de H₂O, sobre la superficie, lo cual decrece la coherencia e imparte friabilidad a la masa del suelo. Esta zona de consistencia friable representa el rango óptimo de humedad del suelo, para el laboreo. Cuando el contenido de humedad aumenta, la cohesión de la película de agua alrededor de las partículas hace que el suelo permanezca unido y el suelo se vuelve plástico (Rucks *et al.*, 2004).

Textura

La textura representa el porcentaje en que se encuentran los elementos que constituyen el suelo; arena gruesa, arena media, arena fina, limo, arcilla. Se dice que un

suelo tiene una buena textura cuando la proporción de los elementos que lo constituyen le dan la posibilidad de ser un soporte capaz de favorecer la fijación del sistema radicular de las plantas y su nutrición (Rucks *et al.*, 2004).

Por medio de la textura de un suelo se pueden estimar ciertos atributos como su capacidad productiva, su comportamiento mecánico, capacidad de retención de agua, capacidad portante, velocidad de infiltración, densidad aparente, capacidad de usos contrastándola con la profundidad y pendiente (Marín, 2011).

Los suelos que tienen una mayor tendencia a compactarse presentan generalmente texturas medias a gruesas. Se ha comprobado que en suelos de texturas medias a gruesas cuando se aplican presiones altas se logra obtener valores más altos de densidad aparente, que en suelos de texturas arcillosas, especialmente cuando los contenidos de limo o arena fina son abundantes. El efecto de la compactación en la reducción de la aireación se hace más crítico en suelos de texturas medias a finas, que en suelos de texturas gruesas, los cuales tienen más macroporos que los suelos de textura fina (Pla, 1977).

Densidad aparente

La densidad aparente (D_a) es una propiedad del suelo ampliamente utilizada en la agricultura, relacionada principalmente con las prácticas de manejo de los suelos y de las aguas. Recientemente ha aumentado la preocupación respecto a la determinación y exactitud en su medición, debido al incremento del uso de irrigación, de tierras cultivadas sin labranza y a la compactación del suelo (Folegatti *et al.*, 2001).

La D_a es la característica que en mayor grado influye sobre la productividad de los cultivos, debido a su estrecha relación con otras propiedades del suelo (Wild, 1992). Incluso, en algunas especies ejerce un mayor efecto que el mismo uso de fertilizantes, el cual puede ser más notable cuando no se aplican estos últimos. Este comportamiento está asociado con las condiciones de disponibilidad y la tasa de difusión de los nutrientes en el suelo (Wolf y Snyder, 2003).

Cuando la densidad aparente del suelo aumenta, se incrementa la compactación y se afectan las condiciones de retención de humedad (Haddad, 2004), limitando a su vez el crecimiento de las raíces (Salamanca y Sadeghian, 2004). La D_a es afectada por las

partículas sólidas y por el espacio poroso, el cual a su vez está determinado principalmente por la materia orgánica (MO) del suelo. A medida que aumenta la MO y el espacio poroso, disminuye la D_a y viceversa. En suelos de textura fina la D_a varía entre 1 y $1,2\text{g.cm}^{-3}$, mientras que en suelos arenosos es mayor y puede variar entre 1,2 y $1,6\text{g.cm}^{-3}$. (Dick, 2004).

La naturaleza, las dimensiones y el arreglo de las partículas del suelo (Brady *et al.*, 1999), además de otros factores relacionados con su formación (6), también influyen sobre los valores de la D_a (Stine *et al.*, 2002).

Porosidad

La porosidad es una propiedad edáfica que tiene una relación directa con la dinámica del agua dentro y fuera del perfil del suelo, siendo su comportamiento decisivo en la generación de escurrimiento, en el movimiento de solutos y en la productividad de los cultivos (Mallants *et al.*, 1997).

La porosidad descrita como el volumen que ocupan los poros (y este se encuentra ocupado por gases y líquidos) con relación al volumen total ocupado por el suelo y está inversamente relacionada con la densidad del suelo (Marín, 2011).

Greenland (1979) refiere que el suelo es básicamente un sistema poroso compuesto por poros de diferente tamaño que cumplen funciones diferentes. En él se encuentran: fisuras, macroporos, mesoporos, microporos, poros residuales. Los macro, son aquellos poros con diámetro equivalente superior a $60\ \mu\text{m}$, los meso son aquellos con diámetro equivalente entre 60 y $0.2\ \mu\text{m}$ y como microporos a aquellos con diámetro inferior a $0.2\ \mu\text{m}$. Los macroporos ($>60\ \mu\text{m}$) cumplen en el suelo funciones muy específicas: son los poros de drenaje, permiten el ingreso del agua al suelo (infiltración, aceptación de aguas), permiten la aireación y crecimiento de raíces.

Los pelos absorbentes casi que exclusivamente crecen dentro de los macroporos, por ello en un suelo de buena calidad, se exige que haya un porcentaje de macroporos mayor del 10% y de que estos sean capaces de deformarse por la presión de turgencia que produce el crecimiento de las raíces. En suelos compactados, hay pocos macroporos y no hay capacidad o muy poca deformación, por ello, las raíces no pueden expandirse o sus cofias no pueden penetrar poros inferiores a sus diámetros, la

consecuencia de esto, es bajo rendimiento del cultivo por poco desarrollo de raíces (Malavolta *et al.*, 1989).

La porosidad del suelo en los primeros centímetros de profundidad determina en gran medida la infiltración y el escurrimiento del agua que condiciona su transporte hacia niveles superficiales o profundos (Bruckler, 1998).

El flujo de agua y aire en el suelo se realiza a través del espacio poroso condicionado por el tamaño, abundancia y distribución de poros (Bonneau y Levy, 1979). La porosidad debe ser considerada un indicador de la calidad del suelo por su capacidad para almacenar agua y permitir el intercambio fisicoquímico y biológico entre las diferentes fases presentes en el suelo (Ruiz *et al.*, 2009).

Las distintas categorías por tamaño de poro influyen de manera diferente en distintos procesos edáficos como la infiltración, el almacenamiento de agua, el drenaje, el intercambio gaseoso y la resistencia al crecimiento de las raíces.

La clasificación del espacio poroso, de acuerdo a sus características de conducción o de almacenamiento, se resumió en tres categorías: 1) porosidad sub microscópica, con poros demasiado pequeños que imposibilitan el flujo continuo; 2) porosidad microscópica o capilar, con poros dados por la matriz del suelo y la estructura entre agregados, su morfología depende de la génesis y el uso del suelo; el tamaño de los poros es entre 15 y 30 μm ; 3) macroporosidad, con poros grandes que pueden tener como origen: la actividad microbiana, grietas, cambios volumétricos contracción-expansión del suelo y la labranza en el caso de suelos agrícolas (Bruckler, 1998).

Los macroporos dependen mucho de la capa vegetal que cubre la superficie del suelo, así como de las condiciones climáticas (Pires *et al.*, 2008). La medición del espacio poroso puede realizarse con herramientas de microscopía y análisis de imagen en secciones delgadas de suelo (Mooney *et al.*, 2007).

La perturbación del espacio poroso, provocada por una carga que supera la resistencia del suelo y produce el colapso de los poros, conduce a procesos de degradación edáfica, declinación productiva de los ecosistemas e impactos hidrológicos importantes (Muhammad y Rattan, 2009).

La materia orgánica en el suelo

Al aumentar el contenido de humus mejoran de forma visible las propiedades hídricas del suelo, se favorece la formación de agregados, se incrementa la proporción de macroporos, aumenta la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y puede disminuir la acidez. También se eleva el aporte de nutrientes al suelo, y con ello el humus, que es la principal fuente de energía para los microorganismos (Jaramillo, 2002).

El contenido de materia orgánica es uno de los indicadores de la fertilidad de los suelos por lo que se considera importante mantener un contenido óptimo (5 %) para el mejor funcionamiento del sistema de producción; la constante manipulación del suelo a través de las actividades de preparación del suelo para ser cultivado, conlleva también a una aceleración en la velocidad de agotamiento de la materia orgánica que posee (*Alejo et al.*, 2012).

Alejo et al. (2012) también refiere que la disminución en la concentración de materia orgánica es consecuencia de la frecuencia de laboreo del suelo ya que estas actividades favorecen la ventilación y exposición de la materia orgánica al ataque de los microorganismos implicando además un descenso en el contenido nutrimental y pérdida de estructura del suelo.

III.- MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló, en el año 2019, en áreas del Bloque Experimental de Guaro (centroide: 20° 40' 8.46" de latitud N y 75° 46' 9.58" de longitud W), perteneciente a la Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (EPICA) de Holguín, Cuba, a 17.4 m sobre el nivel medio del mar. Con una precipitación promedio anual de 1 067.6 mm y una temperatura media mensual de 25.6° C, el clima se considera tropical lluvioso, presenta inviernos secos y veranos húmedos; registrado como *Aw*, según la clasificación de Köppen.

Se tuvieron en cuenta tres tipos de usos de la tierra (pasto natural, caña de azúcar y bosque secundario) establecidos sobre un Vertisol Crómico gléyico cálcico (Hernández *et al.*, 2015). En tres puntos escogidos al azar en cada una de las coberturas vegetales mencionadas se determinó la resistencia a la penetración, la densidad del suelo, la humedad gravimétrica y la humedad volumétrica.

Para la determinación de la resistencia a la penetración se utilizó un penetrómetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf, con la masa impactadora de 4 kg regulada a 0.40 m de altura. La transformación de la cantidad de impactos por dm a megapascales (MPa) se realizó a través de la expresión matemática planteada por Stolf *et al.* (1991):

$$RP \text{ MPa} = 0,547 + 0,675 * N \quad (1)$$

Donde *RP* es resistencia a la penetración y *N* es la cantidad de impactos por dm. Estos resultados fueron expresados en intervalos constantes (10 cm), hasta los 30 cm de profundidad.

Se tomaron, a las mismas profundidades antes mencionadas, muestras inalteradas con cilindros de 105.35 cm³ de volumen y se colocaron en pesa filtros. Se les determinó la masa de suelo húmedo y se pusieron en una estufa a 105 °C, hasta que alcanzaron un peso constante para establecer la masa de suelo seco. Con los datos obtenidos se determinó la densidad aparente (Cid *et al.*, 2004a; Cid *et al.*, 2006):

$$D_a = \frac{m_{ss}}{V} \quad (2)$$

Donde D_a es la densidad aparente, m_{ss} es la masa del suelo seco y V es el volumen del cilindro.

También se obtuvo la humedad gravimétrica, a partir de la ecuación planteada por Cid *et al.* (2004) y Cid *et al.* (2006):

$$\theta_g = \frac{m_{sh} - m_{ss}}{m_{ss}} \quad (3)$$

Donde θ_g es la humedad gravimétrica; m_{sh} es la masa del suelo húmedo y m_{ss} es la masa del suelo seco.

A partir de las ecuaciones (1) y (2) se determinó la humedad volumétrica (Cid *et al.*, 2004a; Cid *et al.*, (2006) :

$$\theta_v = D_a * \theta_g \quad (4)$$

Se realizó, a la matriz de datos no particionada, un Análisis de Componentes Principales para identificar las variables que expliquen la mayor varianza de los datos y estructurar dicha matriz de datos por columnas. Posteriormente se efectuó un análisis de Correlaciones Canónicas para comprobar asociaciones entre dos conjuntos cualitativos de variables (conjunto_1: humedad gravimétrica y humedad volumétrica, que representan la humedad del suelo; conjunto_2: densidad aparente y resistencia a la penetración, que definen la compactación del suelo). Para el análisis estadístico se utilizaron los softwares Statistica 7 y Statgraphics Centurión XV.II.

IV.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra que la 1^{ra} y 2^{da} componentes explican el 71.97 y el 11.12% de la varianza, respectivamente, para un porcentaje acumulativo del 83.09%, como resultado de la combinación lineal de las 12 variables estudiadas. Los valores propios de las dos componentes estuvieron por encima de 1.

Tabla 1.- Vectores propios del análisis de componentes principales.

	1 ^{ra} componente	2 ^{da} componente
Humedad gravimétrica 0-10 cm	0.832365	0.437736
Densidad aparente 0-10 cm	-0.130912	-0.957134
Humedad volumétrica 0-10 cm	0.897024	0.029898
Resistencia a la penetración 0-10 cm	-0.385339	-0.801590
Humedad gravimétrica 10-20 cm	0.698635	0.568651
Densidad aparente 10-20 cm	-0.386745	-0.871434
Humedad volumétrica 10-20 cm	0.721587	0.366494
Resistencia a la penetración 10-20 cm	-0.586691	-0.772924
Humedad gravimétrica 20-30 cm	0.841134	0.449639
Densidad aparente 20-30 cm	-0.744081	-0.314113
Humedad volumétrica 20-30 cm	0.797638	0.419031
Resistencia a la penetración 20-30 cm	-0.833466	-0.412994
Valor del eje	8.635828	1.334533
Porcentaje total de la varianza (%)	71.97	11.12
Valor acumulativo del eje	8.635828	9.970361
Porcentaje acumulativo de la varianza (%)	71.97	83.09

Se observa que la mayor variación (1^{ra} componente) está dada, fundamentalmente, por las propiedades relacionadas con la humedad en los primeros 20 cm y por la hidropedología en la profundidad de 20-30 cm. Mientras que la 2^{da} componente agrupa a las propiedades relacionadas con la compactación del suelo en los primeros 20 cm de profundidad. La 1^{ra} componente resulta 6.47 veces mayor que la 2^{da}. En ambas componentes existe contraposición entre las propiedades hidropedológicas que representan la humedad del suelo y las que determinan la compactación del mismo.

En el caso de la 1^{ra} componente, como su correlación con la humedad es positiva, al aumentar el valor de dicha componente aumenta el contenido de agua en el suelo, lo

cual no ocurre con la compactación del suelo en la capa de 20-30 cm (correlación negativa). Con respecto a la 2^{da} componente, en la medida que el valor de la misma se incrementa, ocurrirá una disminución de la compactación del suelo en los primeros 20 cm de profundidad (correlación negativa).

De la misma manera, Mota *et al.* (2014) encontraron, al utilizar un análisis de componentes principales para evaluar la calidad física de un suelo Cambisol bajo dos usos de la tierra (bosque secundario y el cultivo de la piña) en Apodi (Brasil), que no existía contraposición entre la densidad aparente y la resistencia a la penetración.

La Figura 1 muestra que existen dos grandes grupos, uno formado por la humedad del suelo y otro por la compactación. Además, se observa una relación directa (positiva) entre la densidad aparente y la resistencia a la penetración. En sentido contrario, se encontró una relación inversa (negativa) entre la compactación del suelo (representada por la densidad del suelo y la resistencia a la penetración) y la humedad del suelo (humedad gravimétrica y volumétrica) y que esta contraposición es más notable entre dicho contenido de agua en el suelo y la densidad aparente y la resistencia a la penetración en la profundidad de 20-30 cm.

De lo cual se deduce que el incremento de la compactación del suelo, con la consiguiente reducción del espacio poroso, dificulta la entrada de agua en el suelo, su movimiento a través del mismo y su almacenamiento de forma disponible para las plantas. Esta reducción del volumen de agua aprovechable por las plantas va acompañada de la disminución del desarrollo radicular, lo que disminuye el espacio explorado por las raíces en la búsqueda de agua y nutrientes presentes en el suelo.

Hamza y Anderson (2005) plantean que, el incremento de la humedad propicia la disminución de la densidad volumétrica del suelo, pues las moléculas de agua en el espacio poroso del suelo impiden el acercamiento de las partículas del mismo. Al disminuir la humedad, el suelo se contrae, por lo que disminuye su volumen y aumenta su densidad. Los suelos arcillosos resultan ser muy susceptibles a estos ciclos de humedecimiento y secado.

Salamanca y Sagedhian (2005), en cinco grandes grupos de suelos de las regiones productoras de café de Colombia, encontraron que la densidad aparente se

correlacionaba de forma positiva con la resistencia a la penetración, mientras que lo hacía negativamente con la humedad determinada por el método gravimétrico.

Gao *et al.* (2016) encontraron en los primeros 50 cm de profundidad, un incremento de la densidad aparente y del volumen de microporos desde la superficie hacia las capas más bajas del perfil de un suelo clasificado como Vertisol, en el condado de Lishu, provincia de Jilin (China). El aumento de la densidad aparente provocó, sobre todo en áreas de no laboreo con bajos contenidos de humedad en el suelo, un incremento de la resistencia a la penetración.

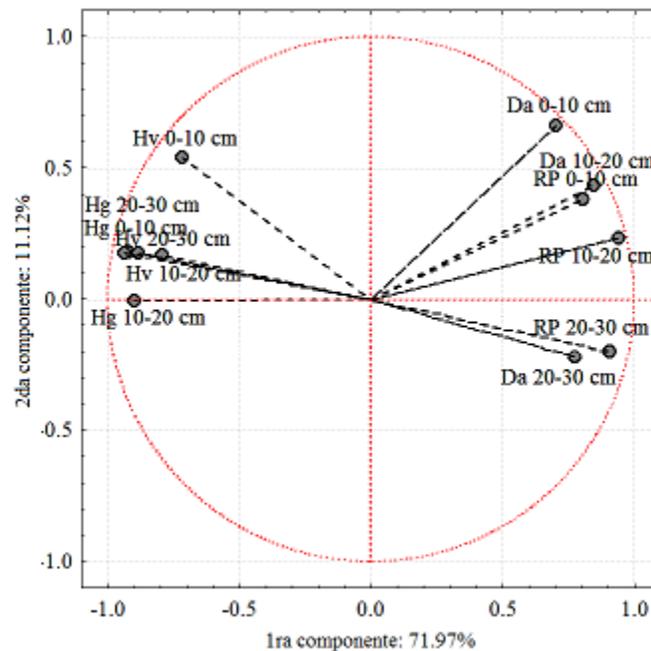


Figura 1.- Dispersión de las propiedades físicas en el análisis de componentes principales. *Da*: densidad aparente; *RP*: resistencia a la penetración; *Hg*: humedad gravimétrica; *Hv*: humedad volumétrica.

De la misma manera, Jorbenadze *et al.* (2017) al estudiar las propiedades físicas de los suelos de Georgia, encontraron que los Vertisoles mostraban un incremento de la densidad aparente con la profundidad; lo cual ocasionaba la disminución de la máxima capacidad del suelo de almacenar agua cuando todo volumen de poros está lleno de agua (agua de saturación), de la cantidad de agua que contiene el suelo previamente

saturado luego de que el exceso ha sido drenado por la acción de la fuerza de gravedad y la velocidad de percolación ha disminuido considerablemente (agua a capacidad de campo), del contenido de humedad del suelo con el que las plantas no pueden reponer el agua suficiente para recuperar su turgencia (punto de marchitez permanente) y de la cantidad de agua disponible para el desarrollo de los cultivos que se encuentra entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente (agua aprovechable).

La Tabla 2 muestra las magnitudes del análisis de Correlaciones Canónicas, en el que las dos funciones canónicas tienen valores altamente significativos. En el caso de la primera función es especialmente fuerte por su alta correlación canónica (0.980682). La lambda de Wilk (λ), cercana a 0, indica que las variables independientes contabilizan casi la totalidad de la varianza.

Tabla 2.- Magnitud de las relaciones que existen entre los dos conjuntos.

Funciones canónicas	Valor del eje	Correlación canónica	Lambda de Wilk	Chi-cuadrada	Grados de libertad	P-level
1	0.961737	0.980682	0.0 107241	106.579	4	0.0000
2	0.719728	0.848368	0.280272	29.892	1	0.0000

Para la segunda función también es alto el valor de su correlación canónica (0.848368), aunque la lambda de Wilk muestra que existe una menor contabilización de la varianza por parte de las variables independientes. Al ser $1 - \lambda$ equivalente al coeficiente de regresión (Badii *et al.*, 2007), se considera que para las variables correspondientes a la primera función $r^2 = 0.9892759$ y para la segunda, $r^2 = 0.719728$.

A partir de la construcción de combinaciones lineales entre las variables de cada conjunto, donde se estandarizaron las variables a partir de la sustracción de la media y la división entre la desviación estándar, se encontraron las correlaciones más grandes. La primera función canónica asociada es:

$$U_1 = -3.20661 * \text{humedad gravimétrica} + 2.68268 * \text{humedad volumétrica} \quad (5)$$

$$V_1 = 0.05807 * \text{densidad aparente} - 0.0742318 * \text{resistencia a la penetración} \quad (6)$$

La segunda función canónica asociada es:

$$U_2 = -1.35281 * \text{humedad gravimétrica} + 2.21713 * \text{humedad volumétrica} \quad (7)$$

$$V_2 = 1.26806 * \text{densidad aparente} - 1.64984 * \text{resistencia a la penetración} \quad (8)$$

Se aprecia que en ambas funciones canónicas existe una relación primaria entre la humedad volumétrica y la densidad aparente, con algunas contribuciones de la humedad gravimétrica y la resistencia a la penetración.

La Figura 2 muestra la correlación entre la *humedad del suelo* (conjunto de variables explicativas CVARA_1) y la *compactación del suelo* (conjunto de variables explicadas CVARB_1). Puede apreciarse que la relación es lineal y con una dispersión regular alrededor de los valores centrales del modelo, aunque con una cierta discontinuidad para los valores encontrados en la profundidad de 20-30 cm.

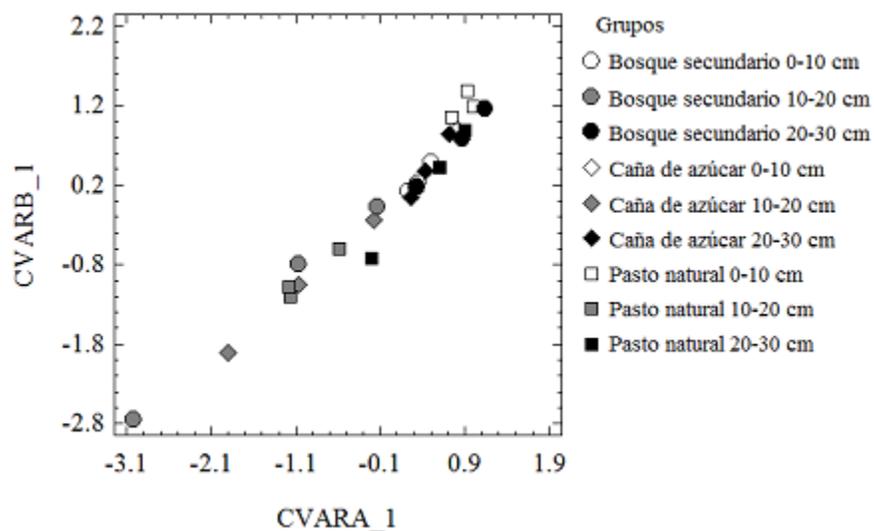


Figura 2.- Asociación entre la *humedad del suelo* (CVARA_1) y la *compactación del suelo* (CVARB_1).

De esta manera cualquier variación que ocurra en el contenido de humedad del suelo provocará cambios en la compactación del mismo. Además, resulta notable el

agrupamiento de las correlaciones entre las variables hidropedológicas por profundidades y no por usos de la tierra. Por lo que los cambios en cuanto a humedad del suelo y compactación del suelo están más influenciados por la profundidad del mismo que por el uso de la tierra. Además, se aprecian cercanías entre las profundidades de 0-10 y de 20-30 cm. La capa de 10-20 cm se encuentra más distanciada y con mayor discontinuidad. Este comportamiento puede estar dado por el hecho de encontrarse en esta profundidad los límites entre el horizonte A y el B y los mayores valores de compactación del suelo.

Krüger *et al.* (2018) señalan que existe correlación entre la resistencia a la penetración y el contenido de humedad del suelo y que esta última es un factor de variación cuando se mide la primera en suelos con diferentes grados de humedecimiento. De esta forma resulta útil la determinación de la resistencia a la penetración en analogía con la detección de problemas concernientes a la captación y el movimiento del agua en el suelo.

Millán *et al.* (2013), al evaluar el efecto de la incorporación de biomasa sobre la curva de compactación y estudiar posibles alteraciones en la densidad y humedad del suelo en un Haplustert Típico localizado en el municipio de Sincelejo, departamento de Sucre (Colombia) encontraron que, por encima de la densidad aparente máxima (determinada mediante el ensayo de Proctor), el incremento de la humedad del suelo provocaba la disminución de la compactación. Por lo que las variaciones de la densidad aparente dependían de los valores de dicha humedad.

V.- CONCLUSIONES

En el Análisis de Componentes Principales, las dos primeras componentes realizan la mayor contribución a la varianza, con un 83.09% de la varianza total. Los mayores aportes (1^{ra} componente) a la varianza total están dados por la humedad en todas las profundidades y por la compactación del suelo en la profundidad de 20-30 cm. La 2^{da} componente está influenciada por la compactación del suelo en las capas de 0-10 y de 10-20 cm de profundidad. Existe contraposición, en todas las profundidades, entre las variables que caracterizan el estado de la fase sólida (densidad aparente y resistencia a la penetración) con las que describen la fase líquida del suelo (humedad gravimétrica y volumétrica).

El análisis de Correlaciones Canónicas muestra la existencia de correlación entre los conjuntos CVARA_1 (humedad gravimétrica y volumétrica) y CVARB_1 (densidad aparente y resistencia a la penetración). Los dos primeros conjuntos de variables canónicas muestran una fuerte correlación (0.980682 y 0.848368, en cada caso). Esta es lineal y se encuentra dispersada regularmente a lo largo de los valores centrales del modelo, con un notable agrupamiento por profundidades.

VI.- BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar Y., Bautista F. y E. Díaz-Pereira. 2011. Soils as natural reactors for swine wastewater treatment. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 13: 199-210.
- Aguilera, M y Martínez, R. (1996). Relaciones agua-suelo-planta-atmósfera. Universidad Autónoma de Chapingo, Chapingo. pp. 256.
- Alejo, Gelasio., Salazar, Fredy., García, J., Arrietta, Beatriz., Jiménez, Victor y Sánchez, Ana. (2012). Degradación físico-química de suelos agrícolas en San Pedro Launillas, Nayarit. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 15:323-328.
- Al-Shammary, A.A.G.; Kouzani, A.Z.; Kaynak, A.; Khoo, S.Y.; Norton, M.; Gates. W. 2018. Soil Bulk Density Estimation Methods: A review. *Pedosphere* 28 (4), 581-596.
- Álvarez, Willin y García, Teodoro. 2008. Representación de la retención de humedad en los suelos mediante el Biplot de regresión con rango reducido. *Revista Ingeniería Uc*, 15(1): 28-37.
- Amézquita, E. 1994a. Propiedades físicas y el manejo productivo de los suelos. In: F. Silva (ed.). *Fertilidad de Suelos: Diagnóstico y Control*. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS), Colombia. pp.137-154.
- Amézquita, E. 1998b. Hacia la sostenibilidad de los suelos de los Llanos Orientales. IX Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo, Paipa–Boyacá, Colombia, Octubre 21- 24 de 1998.
- BAIO, F.H.R.; SCARPIN, I.M.; ROQUE, C.G.; NEVES, D.C. 2017. Soil resistance to penetration in cotton rows and interrows. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 21 (6), 433-439.
- Bonneau, M. et G. Levy. 1979. Assemblage et organization physique des particules. pp. 234-250. In: M. Bonneau et B. Souchier (ed.). *Pédologie 2: Constituants et propriétés du sol*. Elsevier Masson. Paris, France.
- Bradford, J.M. y Gupta, S.C. 1986. Soil compressibility. In: *Methods of soil Analysis*. ASA, Medison. pp.479-492.

- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. The nature and properties of soils. New Jersey, Prentice-Hall, 1999.
- BRIDGE, B. J.; ROSS, P.J.: Relations among physical properties of cracking clay soils. In Properties and Utilization of Cracking Clay Soils (Eds J.W. McGarity, E.H. Hout and H.B. So). Reviews in Rural science 5, pp 97-104, (University of New England: Armidale), 1984.
- Brocca, L.; T. Tullio; F. Melone; T. Moramarco & R. Morbidelli: "Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability", Journal of Hydrology, ISSN-0022-1694, 422-423: 63-75, 2012.
- Bruckler, L. 1998. Les transferts dans le sol. pp. 29-40. In: P. Stengel et S. Gelin (coord.). Sol interface fragile. Editions de l'Institut National de la Recherche Agronomique. Paris, France.
- Buske, T.C.; Dias Robaina, A.; Xavier Peiter, M.; Benetti Rosso, R.; Ricalde Torres, R.; Santos Nunes, M. 2013. Avaliação do desempenho do método das pesagens para a determinação da umidade do solo. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada 7 (6), 340-348.
- Cairo, P y Fundora, O. (2005). Edafología. Editorial Félix Varela 2^{da} Edición, 1^{ra} reimpresión. ed., La Habana, Cuba.
- Camargo, A.P.; Sentelhas, P.C. 1997. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. Revista Brasileira de Agrometeorologia 5, 89-97.
- Camarillo Peñaranda, J.R.; Saavedra Montes, A.J.; Ramos Paja, C.A. 2013. Recomendaciones para seleccionar índices para la validación de modelos. Tecno. Lógicas (Edición Especial, octubre), 109-122.
- Campos, S., López, Juan., Cadena, Martín., Reynolds, Marco., Cuervo, Neftali y Ramírez, Gabriela. (2015). Desarrollo de un penetrómetro integrado con tecnología GPS-RTK para la generación de mapas de resistencia a la penetración del suelo. Terra Latinoamericana. 33:120.

- Castiglioni, M.G., Morrás, H., Santanatoglia, O.J. Y Altinier, M.V. (2004). Análisis de la contracción de agregados de distintos horizontes de Argiudoles de la Pampa ondulada. XIX Congreso Argentino Ciencias del Suelo. Paraná, Entre Ríos (Trabajo en CD 10p).
- Chan, K.Y.; Oates, A.; Swan, A.D.; Hayes, R.C.; Dear, B.S.; Peoples, M.B. 2006. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. *Soil & Tillage Research* 89, 13-21.
- Chancellor, W.J. 1977. Compaction of soil by agricultural equipment. Division of Agriculture, University of California, Berkeley. Bulletin No. 1881.
- Cid, G; Herrera, J.; López, T.: Aspectos a considerar en las soluciones de riego en condiciones de un desarrollo sustentable. En: Memorias Congreso Internacional Cuba-Riego 2005 ISBN 959-7164-95-7, 2005.
- Cid, G; Herrera, J; López, T.; González, F. 2009. Elementos a considerar en la proyección de sistemas de riego en suelos con tendencia al sobre humedecimiento y la salinización en Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, ISSN: 1010-2760, E-ISSN: 2071-0054, 18(3): 54-58.
- Cid, L.G.: Herrera, P.J.: López, S.T.: González, R.F. 2016. Resultados de algunas investigaciones en suelos Vérticos de Cuba”, *Revista Ingeniería Agrícola*, ISSN-2306-1545, E-ISSN: 2227-8761, 6(2): 51-56.
- CITMA, (Ministerio De Ciencia, Tecnología Y Medio Ambiente) “Evaluación de la Degradación de las Tierras en Zonas Secas” Area Piloto: Cuba, 2007.
- Coulombe, C. E., L. P. Wilding, and J. B. Dixon. 2000. Vertisols. pp. 269-286. In: M. E. Sumner (ed.). *Handbook of Soil Science*. CRC Press. New York, NY, USA.
- CZYŻ E.A. 2004. Effects of traffic on soil aeration, bulk density and growth of spring barley. *Soil & Tillage Research* 79, 153-166.
- Damiano, F.; Moschini, R.C. 2011. Intervalo hídrico óptimo en suelos Argiudoles plantados con *Eucalyptus dunnii* Maiden. *Ciencia del Suelo* 29 (1), 1-11.

- De Jong Van Lier, Q.; Gubiani, P.I. 2015. Beyond the “least limiting water range”: Rethinking soil physics research in Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 39, 925-939.
- De Vos, B.; Van Meirvenne, M.; Quataert, P.; Deckers, J.; Muys, B. 2005. Predictive quality of pedotransfer functions for estimating bulk density of forest soils. *Soil Science Society of America Journal* 69, 500-510.
- Dick, R.P. Soil Biological, chemical, and physical dynamics during transition to nonthermal residue management grass seed systems. Online Internet. Oregon, GSCSSA, 2004.
- Domínguez Palacio, D.; Pozo Gálvez, C.; León Sánchez, A.M. 2018. Estimación de la densidad volumétrica y porosidad total usando el penetrómetro. *Cultivos Tropicales* 39 (4), 34-41.
- Ellies, A y Mac Donal, R. (1988). Efecto de la densidad de pastoreo sobre la resistencia a la penetración en un Palehumult en Chile. *Ciencias del Suelo* 6:113-119.
- FAO. 1990. *FAO Yearbook 1989. FAO Statistical Series No.94, Volumen 43.* Roma, Italia.
- Folegatti, M.V.; Brazil, R.P.C. Do; Blanco, F.F. Sampling equipment for soil bulk density determination tested in a Kandudalfic Eutrudox and a Typic Hapludox. *Scientia Agricola* 58: 833-838. 2001.
- Forsythe, W. (1997). Las condiciones físicas, la producción agrícola y la calidad del suelo. *Agronomía Costarricense* 21:35-47.
- Gao, W.; Ren, T.; Bengough, A.G.; Auneau, L.; Watts, C.W.; Whalley, W.R. 2012. Predicting penetrometer resistance from the compression characteristic of soil. *Soil Science Society of America Journal* 76, 361-369.
- Gavande, A. (1982). *Física de suelos, principios y aplicaciones*, México.
- Gavande, A.S. 1982. *Física de suelos, principios y aplicaciones*. México, Ed. Limusa. 351 p.

- Gonçalves, W.G.; Severiano, E. Da C.; Silva, F.G.; Costa, K.A. De P., Guimarães Junior, W. Da S.; Melo, G.B. 2014. Least limiting water range in assessing compaction in a brazilian cerrado Latosol growing sugarcane. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38, 432-443.
- González Cueto, O.; Iglesias Coronel, C.E.; Herrera Suárez, M.; López Bravo, E.; Sánchez Iznaga, Á. 2008. Efecto de la humedad y la presión sobre el suelo en la porosidad total de un Rhodic Ferralsol. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 17 (2), 50-54.
- González, Omar., Iglesias, Ciro y Herrera, Miguel. (2009). Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Ciencias Técnicas Agropecuarias* 18:57-63.
- Greenland, D. (1979). Structural organization of soil and crop production, in: S. P. C. a. C. P. i. t. Tropics. (Ed.), Chichester, England. pp. 45-57.
- Greenland, D. J. y Szabolcs, I. (1994). Soil resilience and sustainable land use. CAB International. Ovon. U.K. pp: 561.
- Guimarães, R.M.L.; Tormena, C.A.; Blainski, É.; Jonez Fidalski, J. 2013. Intervalo hídrico ótimo para avaliação da degradação física do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37, 1512-1521.
- Haddad, N. Introduction - Why Study Earth System Science. Online Internet. Cambridge, TERC, 2004.
- Harris, W. (1971). The soil compaction process, *Compaction of Agricultural Soils*. ASAE, Michigan, EUA. pp. 9-44.
- Harris, W.L. 1971. The soil compaction process. In: Barnes, K.K. et al. *Compaction of Agricultural Soils*. ASAE, St.Joseph, Michigan. pp.9-44.
- Hernández Jiménez, A.; Pérez Jiménez, J.M.; Bosch Infante, D.; Castro Speck, N. 2015. Clasificación de los suelos de Cuba. INCA Ediciones, San José de Las Lajas, Cuba. 91 p.

- Hernández, A., Llanes, Violeta., López, Dagoberto y Rodríguez, Jesús. (2014). Características de Vertisoles en áreas periféricas de La Habana. *Cultivos Tropicales*, 35:68-74.
- Hernández, A.; Pérez, J. M.; Bosch, D. y Rivero, L. Nueva versión de la clasificación genética de los suelos de Cuba. AGRINFOR. Instituto de Suelos. La Habana.1999. 64 pp. ISBN 959-246-022.
- Hernández, A.; Ascanio. O. y Pérez, J. M. Informe sobre el mapa genético de los suelos de Cuba en escala 1:250 000. *Rev. de Agricultura*, 1971, vol. 4, no. 1, pp. 1-21. ISSN 0034-7655.
- Herrick, J.E.; Jones, T.L. 2002. A dynamic cone penetrometer for measuring soil penetration resistance. *Soil Science Society of América Journal* 66, 1320-1324.
- Hincapié, Edgar. 2011. Estudio y modelación del movimiento del agua en suelos volcánicos de ladera. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia. 200 pp.
- Hosseini, M.; Movahedi Naeini, S.A.M.; Dehghani, A.A.; Khaledian, Y. 2016. Estimation of soil mechanical resistance parameter by using particle swarm optimization, genetic algorithm and multiple regression methods. *Soil & Tillage Research* 157, 32-42.
- Hyndman, R.J.; Koehler, A.B. 2006. Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting* 22, 679-688.
- ISRIC (International Soil Reference and Information Centre). 2013. The Vertisols. Disponible en www.isric.org/isric/webdocs/docs/major_soils_of_the_world/set3/vr/vertisol.pdf.
- Instituto de Suelo. Segunda Clasificación Genética de los Suelos de Cuba. Academia de Ciencias de Cuba. Serie Suelos 23. 1975. 36 pp.
- Jaramillo, D.F. (2002). Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín, Medellín, Colombia.

- Jordan, A. (2006). Manual de Edafología., Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Universidad de Sevilla, Sevilla, España. pp. 143.
- Kaur, R.; Kumar, S.; Gurung, H.P. 2002. A pedo-transfer function (PTF) for estimating soil bulk density from basic soil data and its comparison with existing PTFs. Australian Journal of Soil Research 40, 847-857.
- Landini, Ana.; Martínez, Daniel.; Días, Hugo.; Soza, Eduardo.; Agnes, Diego Y Sainato, Claudia. 2007. Modelos de infiltración y funciones de pedotransferencia aplicados a suelos de distinta textura. Ciencias del Suelo (Argentina), 25(2): 123-131.
- Lara Coba, D.; Herrera Suárez, M.; García Lorenzo, M.M.; Beltrán, R. 2018. Modelo computacional para la estimación de la densidad del suelo a través del sensoramiento continuo. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias 27 (1), 46-53.
- López, D.; Morell, F.; Balmaceda, C. y Hernández, A. La Rosita. I. Características y distribución de los suelos. Cultivos Tropicales, 2010, vol. 31, no. 1, pp. 41-47. ISSN 1819-4087.
- Martha A. Ribón Carrillo, Sergio Salgado García, David J. Palma-López y Luz del C. Lagunes-Espinoza (2003). Propiedades Químicas Y Físicas De Un Vertisol Cultivado Con Caña De Azúcar. Interciencia versión impresa ISSN 0378-1844 INCI v.28 n.3 Caracas mar. 2003
- Makovníková, J.; Širáň, M.; Houšková, B.; Pálka, B.; Jones, A. 2017. Comparison of different models for predicting soil bulk density. Case study.- Slovakian agricultural soils. International Agrophysics 31, 491-498.
- Malavolta, E., G.C. Vitti y S.A. De Oliveira. (1989). Availacao do estado nutricional das plantas: principios e aplicaciones., Associacao Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. POTAFOS., Brasil. pp. 200.
- Mallants, D; BP Mohanty; A Vervoort & J Feyen. 1997. Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores. Soil Technology 10: 115-131.

- Marín, Guillermo. (2011). Edafología 1, Proyecto UNICA "Universidad en el Campo". Universidad de Caldas - Unión Europea.
- Martínez, Daniel.; Landini, Ana.; Soza, Eduardo.; Sainato, Claudia y Heredia, Olga. 2010. AgroCiencia, Revista Chilena de Ciencias Agropecuarias, 27(1):15-27. ISSN 0716-1689.
- Millán, E.; Ruiz, H.A.; Fernández, R.B.A.; Costa, L.M. Da. 2014. Conductividad e hidráulica, porosidad, resistência mecânica e intervalo hídrico óptimo em Latossolos artificialmente compactados. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 18 (10), 1003-1009.
- Mome Filho, E.A.; Silva, A.P. Da; Figueiredo, G.C.; Gimenes, F.H.S.; Vitti, A.C. 2014. Compared performance of penetrometers and effect of soil water content on penetration resistance measurements. Revista Brasileira de Ciência do Solo 38, 744-754.
- Mooney, S. J., C. Morris, J. Craigon, and P. Berry. 2007. Quantification of soil structural changes induced by cereal anchorage failure: Image analysis of thin sections. J. Plant Nutr. Soil Sci. 170: 363-372.
- Morejón, Yanoy., González, Roberto., García, Armando., Vega, Ernesto., Pérez, Jorge y Cuellar, L. (2016). Influencia de la cosecha mecanizada de la caña de azúcar en la compactación del suelo. Ingeniería Agrícola 6(1):33-38.
- Mota, J.C.A.; Alencar, T.L. De; Assis Júnior, R.N. De. 2015. Alterações Físicas de um Cambissolo Cultivado com Bananeira Irrigada na Chapada do Apodi, Ceará. Revista Brasileira de Ciência do Solo 39, 1015-1024.
- Muhammad, A. and L. Rattan. 2009. Tillage and drainage impact on soil quality: II. Tensile strength of aggregates, moisture retention and water infiltration. Soil Tillage Res. 103: 364-372.
- Mur, M.; Balbuena, R.H. 2014. Compactación de un suelo Argiudol típico por tráfico en un sistema de producción de forrajes. Ciencia del Suelo 32 (1), 1-12.
- Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. I.- A discussion of principles. Journal of Hydrology 10, 282-290.

- Nasri, B.; Fouché, O.; Torri, D. 2015. Coupling published pedotransfer functions for the estimation of bulk density and saturated hydraulic conductivity in stony soils. *Catena* 131, 99-108.
- Nemes, A., Rawls, W.J., and Y. A. Pachepsky. 2005. Influence of organic matter on the estimation of saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1330-1337.
- Ortigara, C.; Moraes, M.T. De; Debiassi, H.; Silva, V.R. Da; Franchini, J.C.; Luz, F.B. Da. 2015. Modeling of soil load-bearing capacity as a function of soil mechanical resistance to penetration. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 39, 1036-1047.
- Pachepsky, Y. A., Rawls, W. J. and H. Lin. S. 2006. Hydropedology and pedotransfer functions. *Geoderma* 131: 308-316.
- Paneque, J. (1984). Étude des sols argileux foncés de Cuba. Distribution, caractérisation et genèse, Tesis Master Science. Ing. USTL-ENSA Montpellier, 175pp.
- Pillinger, G.; Géczy, A.; Hudoba, Z.; Kiss, P. 2018. Determination of soil density by cone index data. *Journal of Terramechanics* 77, 69-74.
- Pires, L. F., A. M. Cásaro, K. Reichardt, and O. S. Bacchi. 2008. Soil porous system changes quantified by analyzing soil water retention curve modifications. *Soil Tillage Res.* 100: 72-77.
- Pla, I. 1977. Dinámica de las propiedades físicas y su relación con problemas de manejo y conservación en suelos agrícolas de Venezuela. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Maracay, Venezuela. 200 p.
- Pla, I. (1977). Dinámica de las propiedades físicas y su relación con problemas de manejo y conservación en suelos agrícolas de Venezuela., Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Maracay, Venezuela. pp. 200.
- Potter, K.; Gerik, T. (2001). The Vertisols of Texas. (P. 267-279). In: J. Syes, F. Penning de Vries, P. Nyamedeza. *The Sustainable Management of Vertisols*. CABI Publishing, U.K.

- Pozzolo, O.; Wilson, M.; De Battista, J.J.; Cerana, J. (2001). El tránsito de maquinaria en suelos inundados. Efectos sobre la impedancia en el perfil edáfico. IV Congreso internacional de Ingeniería Agrícola. Chillán, Chile. p.5
- Ralisch, R.; Miranda, T.M.; Okumura, R.S.; Barbosa, G.M. De C.; Guimarães, M. De F.; Scopel, E.; Balbino, L. C. 2008. Resistência à penetração de um Latossolo Vermelho Amarelo do Cerrado sob diferentes sistemas de manejo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 12 (4), 381-384.
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J y Hill, M. (2004). Propiedades Físicas del Suelo, Universidad de la República de Uruguay, Facultad de Agronomía, Uruguay. pp. 68.
- Ruiz, N., E. Velásquez, A. Pando, T. Decaens, et F. Dubs. 2009. Indicateurs synthétiques de la qualité du sol. *Etu. Gest. Sols* 16: 323-338.
- Sales, M.M. De; Araújo Neto, J.R. De; Araújo De Queiroz Palácio, H.; Guerreiro Chaves, L.C.; Firmino Gomes, F.E. 2014. Variação espacial e modelagem da salinidade das águas superficiais de reservatórios da bacia metropolitana do Ceará. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* 8 (5), 354-365.
- Salgado, E. (2001). Relación suelo-planta-agua., Ediciones Universitarias de la Universidad Católica de Valparaíso., Valparaíso. pp. 25.
- Smith, G.D., Gardner, E.A., Shaw, R.J., Coughland, K.J., Yule, D.F. (1991). Some principles for managing vertisols in the Semi-Arid Tropics. En *Irrigated Vertisols in Cuba, Consultant's Reports, FAO Project CUB/86/003, Cuba.*
- Soane, B.D. y Van Owerkerk, C. 1994. Soil compaction problems in soil agriculture. In: B.D. Soane and C. Van Owerkerk (Editors). *Soil Compaction in Crop Production.* Elsevier, Amsterdam, pp.1-22.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to soil taxonomy.* 12 th ed. US Department of Agriculture; Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, USA.
- Stine, M.A; Weil, R.R. The relationship between soil quality and crop productivity across three tillage systems in South Central Honduras. *American Journal of Alternative Agriculture* 17: 2-8. 2002.

- Stolf, R. 1991. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 15, 229-235.
- Stolf, R.; Fernández, J.; Furlani, V.L. 1983. Recomendação para uso do penetrómetro de impacto modelo IAA/planasucar-Stolf. *Revista Azúcar, Alcohol e Subproductos* 1 (3), 235-241.
- Teixeira, R.B.; Borges, M.C.R.Z.; Roque, C.G.; Oliveira, M.P. 2016. Tillage systems and cover crops on soil physical properties after soybean cultivation. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 20 (12), 1057-1061.
- Toledo, V y Millán, Zuly. (2016). Construcción y calibración de un penetrómetro de impacto para medir los efectos del senderismo. *Ciencia, Docencia y Tecnología*. 27:485.
- Torrealba, Andrés. 2008. Aplicación de un modelo numérico para estimar curvas de evaporación a partir de información de granulometría básica. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Pontificia Universidad Católica de Chile Escuela de Ingeniería, Santiago de Chile, Chile. 100pp.
- Torres, Carlos.; Gutiérrez, Ma. Del Carmen.; Ortiz, Carlos Alberto y Gutiérrez, Edgar Vladimir Castorena. 2016. Manejo agronómico de los Vertisoles en México: una revisión. *Revista Terra Latinoamericana*, 34(4): 457-466.
- Valadão Junior, D.D.; Biachini, A.; Valadão, F.C.A.; Rosa, R.P. 2014. Penetration resistance according to penetration rate, cone base size and different soil conditions. *Bragantia* 73 (2), 171-177.
- Valdés, Nidia., González, Luis y E, Adrián. (2011). Estimación de la resistencia a la penetración de suelos usando redes neuronales artificiales. *Acta Agronómica* 60:258-268.
- Vallejos, A.; Kees, M.; Bondia, P.; Echeverría, N.; Silenzi. J.; Zajac, C.; De Lucia, M. 2014. Subsulado 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.; Maria, I.C. De; Genuchten, M.Th. Van. 2013. Scaling the dependency of soil penetration resistance on water content and bulk density of different soils. *Soil Science Society of America Journal* 77, 1488-1495.
- Voorhees, W.D. 1987. Assessment of soil susceptibility to compaction using soil and climatic data bases. *Soil Tillage Res.* 10:29-38.
- Wild, A. *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell*. Madrid, Ediciones Mundiprensa, 1992. 1045 p.
- Willmott, C.J. 1985. On the validation of models. *Physical Geography* 2, 84-194.
- Wilson, M. Y Cerana, J. (2004). Mediciones físicas en suelos con características vérticas. *Revista Científica Agropecuaria*. 8(1):11-22.
- Wolf, B.; Snyder, G. *Sustainable soils; the place of organic matter in sustainable soils and their productivity*. New York, Food Products Press, 2003. 352 p.