

**FACULTAD DE
CIENCIAS NATURALES y AGROPECUARIAS**

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

**Título: Retención de humedad en los suelos Ferríticos Rojos Oscuros
típicos de Pinares de
Mayarí bajo diferentes usos de la tierra**

Autor: Hilario Alejandro Cruzata Matos

Tutor: MSc. Juan Alejandro Villazón Gómez

Curso 2021-2022

RESUMEN

El trabajo se llevó a cabo durante el año 2022, en Pinares de Mayarí, provincia de Holguín, con el objetivo de evaluar la retención de humedad de los suelos Ferríticos Rojos Oscuros típicos de Pinares de Mayarí bajo diferentes usos de la tierra. Se realizó un muestreo aleatorio estratificado en tres usos de la tierra en el horizonte A1. Los usos escogidos fueron *Caña de azúcar*, *Pasto natural*, *Bosque de pinos*. Una menor densidad del suelo y mayor porosidad total, así como una mejor relación de macroporos y microporos indican que en los suelos bajo los usos *Bosque de pinos* y los procesos asociados con la degradación física tuvieron una menor influencia al ser comparados con los usos bajo gramíneas. La curva tensión-humedad mostró un mayor volumen de macroporos en las áreas boscosas. En *Caña de azúcar* y *Pasto natural* es menor la retención de humedad en las tensiones más bajas.

Palabras claves: Propiedades físicas de los suelos, Curvas de retención de humedad del suelo, Influencia antrópica.

ABSTRACT

The work took to end 2022 during the year, in Mayarí's Pinares, Holguín's province, for the sake of evaluating softly Mayarí's retention of humidity of Pinares's Ferríticos Rojos Oscuros typical grounds different uses of the land. A1 accomplished a stratified random sampling in three uses of the land in the horizon himself. The chosen uses were *Sugarcane*, *natural Pasture*, and *Forest of pines*. A minor density of the ground and bigger total porosity, as well as a better relation of macropores and micropores indicate than at the low grounds uses *Forest of pines* and the processes correlated with the physical degradation had a minor influences the being compared with softly uses graminaceous. Soil water retention curves showed macroporos's bigger volume in the forested areas. In *Sugarcane* and *the natural Pasture* is younger the retention of humidity in the lowermost tensions.

Contenido

INTRODUCCIÓN	5
Problema científico	6
Hipótesis	6
Objetivo general	6
Objetivos específicos	6
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
Los suelos Ferríticos	7
Cambios en las propiedades de los suelos según el tipo de cobertura vegetal .	11
El agua en el suelo	15
Propiedades hidráulicas de los suelos	19
Algunas propiedades de los suelos que influyen en el comportamiento de la curva tensión-humedad	21
La materia orgánica en el suelo	28
MATERIALES Y MÉTODOS	30
Características de la zona	30
Descripción de los usos de la tierra	32
Muestreo de suelos	33
Curva tensión-humedad	33
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
CONCLUSIONES	42
RECOMENDACIONES	43
BIBLIOGRAFÍA	44
ANEXOS	49

INTRODUCCIÓN

Las propiedades del suelo tienen una notable influencia en el balance del agua contenida en el mismo. El conocimiento de estas propiedades, de su comportamiento bajo diferentes condiciones edáficas y la forma en que regulan la circulación hídrica, es de particular importancia en las áreas dedicadas a usos agrícolas para lograr un adecuado manejo de los recursos hídricos y alcanzar un desarrollo sustentable a través de un manejo agro técnico y uso de la tierra adecuados. (Lipiec *et al.*, 2007; Czyż y Dexter, 2009).

La subsistencia de las plantas depende de la utilización que estas hagan del agua contenida en el sistema suelo-planta-atmósfera (Giráldez *et al.*, 2011). La curva de retención de agua del suelo es la relación entre el contenido de humedad, expresado en valores volumétricos, y el potencial matricial del suelo (Rucks *et al.*, 2004; Ruíz *et al.*, 2006; López *et al.*, 2010). La misma es un aspecto importante a tener en cuenta a la hora de establecer las necesidades de riego y drenaje en un área determinada (Fooladmand y Habibi, 2012). La forma de la curva depende, entre otros factores, del manejo agrícola que se lleve a cabo (Green *et al.*, 2003).

Tiene gran importancia desde el punto de vista agrícola, pues se utiliza para determinar la cantidad de agua disponible en el suelo, estimar determinados valores característicos de la relación suelo-planta-agua, como es el caso de la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente; clasificar los suelos; detectar cambios en la estructura del suelo y determinar la relación entre la tensión de la humedad del suelo y otras propiedades físicas (Stakman, 1980). De esta manera, resulta fundamental para una adecuada planificación y manejo de los recursos hídricos (Shwetha y Varija, 2015). Además, resulta esencial a la hora de interpretar y predecir los cambios en la cobertura vegetal, sobre todo cuando esta ocurre como resultado de una sucesión natural (Kalicka *et al.*, 2008).

Los Oxisoles abarcan amplias regiones en las llanuras interiores de América del Sur, las planicies del África central e importantes áreas de Asia, Australia y Oceanía. Están presentes, además, en muchas islas ubicadas en las zonas tropicales y subtropicales del planeta, en el que ocupan una superficie de 9.61 millones de km² (FAO, 2006).

Estos suelos tienen entre sus principales factores edáficos limitantes el concrecionamiento, la compactación, la acidez, la baja fertilidad y poca retención de humedad (Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar, 2007). Estas características provocan, entre otros efectos negativos, la atrofia y disminución de la cantidad de raíces, disminución de la aireación, poca capacidad de absorción, retención de agua y nutrientes, empobrecimiento de los suelos y disminución de la fertilidad y la limitación de la profundidad efectiva (Cuéllar *et al.*, 2002).

Problema científico

¿En qué medida diferentes usos de la tierra inducen cambios en la retención de humedad de los suelos Ferríticos Rojos Oscuros típicos?

Como posible respuesta al problema científico nos planteamos la siguiente hipótesis.

Hipótesis

El uso de la tierra influye en el comportamiento de la retención de humedad en los suelos Ferríticos Rojos Oscuros típicos.

Para la solución del problema nos trazamos los objetivos que a continuación se detallan:

Objetivo general

Evaluar la retención de humedad de los suelos Ferríticos Rojos Oscuros típicos de Pinares de Mayarí bajo diferentes usos de la tierra.

Objetivos específicos

Caracterizar el comportamiento de la retención de humedad de los suelos Ferríticos Rojos Oscuros típicos de Pinares de Mayarí.

Evaluar el efecto de usos forestales de pinos, pastos naturales y caña de azúcar sobre la retención de humedad de estos suelos.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Los suelos Ferríticos

En Cuba, los suelos Ferríticos se desarrollan sobre rocas ígneas ultrabásicas serpentinizadas que han sufrido un severo metamorfismo. La edad de estos macizos ultrabásicos constituidos por peridotitas, en las que juegan un papel fundamental las hartzburgitas, se remonta al Cretáceo superior. Son suelos maduros, bien desarrollados, donde el ciclo geológico ha superado al biológico (Instituto de Suelos, 1973).

La Dirección General de Suelos y Fertilizantes (1985) plantea que estos suelos se caracterizan por ser de color rojo, profundos, con una vegetación característica, un contenido de Fe y Al muy alto y tenores variables de perdigones o concreciones de hierro. Tienen entre sus principales factores limitantes el concrecionamiento, la compactación, la acidez, la baja fertilidad y poca retención de humedad (Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar, 1996; Cuéllar *et al.*, 2002; Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar, 2007).

Estas características provocan, entre otros efectos negativos, la atrofia y disminución de la cantidad de raíces, disminución de la aireación, poca capacidad de absorción, retención de agua y nutrientes, empobrecimiento de los suelos y disminución de la fertilidad y la limitación de la profundidad efectiva (Cuéllar *et al.*, 2002).

Mesa *et al.* (1982), Al valorar 121 series de suelos cubanos y agruparlos en cuatro categorías según el potencial `productivo de los mismos de forma general y en términos relativos, no solo con respecto a un cultivo particular sino a la productividad del área como un todo, determinaron que en los suelos de la serie Nipe (Ferríticos) el frijol y el mango, se consideran medianamente aptos (entre el 50 y el 70% de potencial agroproductivo). Como mediocres con fuertes limitaciones (30-50%) se contemplan los cultivos de aguacate, ajo, café bajo sol, cebolla, cítricos exigentes, frutabomba, guayaba, maní, melón, pastos exigentes, piña, plátano, sorgo y tomate. Mientras que son inadecuados (pues se encuentran por debajo del 30% del potencial) para las plantaciones de arroz, boniato, caña de azúcar, kenaf, malanga, maíz, papa, tabaco y yuca.

Están afectados por la erosión hídrica, e incluso eólica. En el caso de la primera, el fuerte lavado de las partículas más finas ha provocado que queden las más groseras, con los altos tenores de Fe mencionados anteriormente (Dirección General de Suelos y Fertilizantes, 1985). Las condiciones naturales que influyen en los procesos erosivos de los suelos de la Altiplanicie de Nipe son el relieve y microrrelieve, las condiciones pedológicas y geológicas, las condiciones climáticas e hidrológicas y la edad de los suelos de la región. Los tipos de erosión que se manifiestan en los Ferríticos de Pinares de Mayarí son la erosión laminar, en canales, piramidal superficial y en cárcavas (Hylsky, 1970).

También, según Geigel (1979), existen grandes áreas erodadas por la acción antrópica, fundamentalmente la industria extractiva de minerales, pues durante más de 70 años la actividad minera ha jugado un papel fundamental en la economía de la región, debido a los ricos yacimientos de hierro, níquel y cobalto existentes.

En la Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba, que combina los principios genéticos geográficos con los nuevos conceptos de horizontes y características de diagnóstico aparecen denominados como Ferríticos Rojos Oscuros (Hernández *et al.*, 1999). Su correlación con otras clasificaciones de suelos se muestra en la Tabla 1. (Ver en los anexos)

Distribución y extensión

En el mundo abarcan amplias regiones en las llanuras interiores de América del Sur, las planicies del África central e importantes áreas de Asia, Australia y Oceanía. Están presentes, además, en muchas islas ubicadas en las zonas tropicales y subtropicales del planeta, en el que ocupan una superficie de 9.61 millones de km² (FAO, 2006).

En el caso específico de Cuba, se encuentran ubicados en tres regiones: Meseta de Cajalbana (norte de la Sierra del Rosario, provincia de Pinar del Río), Pediplano de Camagüey y norte de la Sierra de Cubitas (provincia de Camagüey) y Pinares de Mayarí, Nicaro y Moa (nordeste de la provincia de Holguín) y abarcan una extensión aproximada de entre 1 772 y 1 800 km² (Instituto de Suelos, 1973).

Geología y geomorfología

Durante los procesos de formación de suelos ha ocurrido una acción conjunta de los factores geológicos y geomorfológicos sobre las formaciones de rocas ultra básicas (peridotitas, entre las cuales abundan las hartzburgitas) que se han metamorfoseado a serpentinitas. (Instituto de Suelos, 1973). La meseta de Pinares de Mayarí, donde se encuentran los suelos Ferríticos, está ubicada en una zona de montañas bajas diseccionadas con una superficie de aplanamiento sobre restos de la corteza de intemperismo antigua (Dirección General de Suelos y Fertilizantes, 1985). El Instituto de Suelos (1973) plantea que esta región está formada por complejos acumulativos de denudación en superficies antiguas de nivelación con alturas entre los 200-1200 msnm, donde los Ferríticos han ocupado, independientemente de la altura, todas las posiciones geomorfológicas estables existentes, excepto las de pendientes abruptas.

Vegetación

Según la Dirección General de Suelos y Fertilizantes (1985), la vegetación está compuesta por pinos (*Pinus cubensis*) y helechos arborescentes (*Cyathea arborea*), espartillo común (*Sporolobus indicus*), pajón macho (*Sorghastrum stipoides*), yagruma (*Cecropia peltata*) y jiribilla (*Andropogon caricosus*). También pueden encontrarse latifolias (Instituto de Suelos, 1973) que forman bosques de galerías en las márgenes de los ríos.

En Cuba, los pinares deben ser considerados como formaciones extra zonales, cuya existencia está condicionada por los factores limitativos edáficos que impiden el establecimiento natural de formaciones de latifolias. En contacto con este tipo de bosque, los pinares pueden ocupar inicialmente las zonas desnudas, pero son posteriormente desplazados por las latifolias que se establecen bajo el dosel de los pinos. Una vez establecido el bosque de hojas anchas, el mismo sustituye, a menos que ocurra un fenómeno natural o por la intervención del hombre, a la formación de pinos (Samek, 1969).

Clima

Los suelos Ferríticos aparecen en la denominada Faja de Clima Tropical Húmedo, por encima de los 400 msnm (Vantour *et al.*, 2006). Anualmente caen entre 1 800-2 200 mm (Vantour *etal.*, 2001). El promedio de la suma anual de temperaturas (mayores de 10°

C), se encuentra entre 8 000 y 8 500° C. En general, se mantienen las altas temperaturas durante todo el año, con un promedio anual de entre 25-27° C. Las abundantes precipitaciones, que varían de una localidad a otra debido a la influencia del relieve, constan de dos períodos estacionales, uno con abundantes precipitaciones y otro con escasez de lluvias. La humedad relativa es alta durante todo el año (Instituto de Suelos, 1973).

Edad de los suelos

Son considerados como los más antiguos de Cuba. Por la potencia de sus horizontes y el grado de evolución y las características de algunos relieves geomorfológicos, puede deducirse que han estado en evolución desde, por lo menos, el Plioceno; y que en la actualidad existen todas las condiciones necesarias para que continúen su proceso de formación (Instituto de Suelos, 1973).

Proceso de formación

El proceso de formación de estos suelos ha sido el de Ferritización que, al igual que la Alitización y Ferralitización, se debe a la acción enérgica y continua del intemperismo en las superficies estables y antiguas del paisaje de las regiones tropicales húmedas del planeta. Ocurre solamente a partir de rocas ultrabásicas serpentinizadas. El intenso intemperismo provoca la destrucción de los minerales primarios y el lavado de las bases cambiables, con una fuerte acumulación de óxidos e hidróxidos de hierro, provenientes del material originario (Hernández *et al.*, 2006).

De esta forma, la sílice está fijada con otros minerales en la roca madre, y el cuarzo libre es casi inexistente. Durante el proceso de formación desaparece el MgO, cuyo contenido en la serpentina alcanza entre el 22-44%. Luego salen los demás óxidos y en la masa de suelo se acumula principalmente el hierro en forma de minerales secundarios y óxidos libres (Cairo y Fundora, 2005).

Propiedades de los suelos Ferríticos

Según Hernández *et al.* (2006), la acumulación intensa de los sesquióxidos de hierro, principalmente hematita y goetita, conlleva a una serie de propiedades muy específicas de los Ferríticos, entre las cuales tenemos el color rojo oscuro en todo el perfil del

suelo; desarrollo sobre una corteza de intemperismo antigua; la formación de concreciones ferruginosas en forma de perdigones, que pueden alcanzar un contenido igual o mayor al 20%; capacidad de intercambio catiónico menor de 12 cmol(+) kg⁻¹; composición de minerales secundarios representada por hematita, goetita, un poco de gibsita y trazas de minerales del tipo 1:1 ; reacción poco ácida a neutra, con valores de pH en agua y KCl semejantes, a veces la acidez es menor en este último; estructura de agregados finos, friables, poca estabilidad; generalmente con un horizonte Bt y bajo contenido en potasio y fósforo, con muy alta capacidad de fijación de fósforo (ver anexos 1 y 2).

Cambios en las propiedades de los suelos según el tipo de cobertura vegetal

Es importante preservar de la degradación a la fertilidad del suelo y la calidad del agua, pues ambos son vitales para la supervivencia del hombre. La degradación de los suelos es un problema global que se manifiesta en forma de erosión hídrica o eólica, salinización, acidificación, disminución de la fertilidad del suelo, contaminación y compactación. Algunas formas de degradación son irreversibles a corto plazo. La magnitud de la erosión hídrica, por ejemplo, depende de las propiedades edáficas y litológicas, del clima, la topografía y el uso de la tierra (Kirkby *et al.*, 2000). Este último factor es de gran importancia pues está vinculado directamente con el hombre (Abrishamkesh *et al.*, 2011).

La influencia del uso de la tierra sobre las propiedades morfológicas, físicas y químicas del suelo es un hecho comprobado desde hace mucho tiempo (Mudarra *et al.*, 1990). Según Cairo y Fundora (2005), desde las primeras décadas del siglo XX, se fundamentó por primera vez la importancia de la influencia antrópica como factor de formación de los suelos pues, la utilización de los mismos para la agricultura tiene notable influencia en su formación natural y sus propiedades. Jaramillo (2002) relaciona algunas actividades antrópicas y su efecto (perjudicial o beneficioso) sobre el suelo. Entre ellas, “el uso irracional (tipo y/o intensidad de uso no adecuados a las posibilidades del suelo) genera un deterioro severo en sus propiedades, lo que se refleja en una pérdida de productividad y de cobertura vegetal, aumentando la susceptibilidad a la erosión; la aplicación intensiva de insumos a un suelo con baja

productividad puede generar problemas de contaminación, tanto del suelo mismo, como de otros recursos como el agua”.

El cambio de uso provoca modificaciones en las propiedades del suelo (Soane, 1990). Las labores agrícolas para desmontar y preparar el suelo para los diversos cultivos, son responsables de dichos cambios; los cuales, con frecuencia, pueden causar degradación y disminuir la productividad de las plantaciones (Buol y Stokes, 1997). Los suelos que en estado natural mantienen una vegetación autóctona, presentan características físicas adecuadas al normal desarrollo de las plantas (Andreola *et al.*, 2000). Cuando el uso del suelo cambia hacia las explotaciones agrícolas ocurre una modificación drástica en sus propiedades físicas, que alteran desfavorablemente el crecimiento vegetal (Spera *et al.*, 2004).

Bennett y Allison (1966) encontraron en Cuba, en 1928, ejemplos de sitios que soportaban una buena cobertura vegetal y que, al ser dedicados posteriormente al cultivo intensivo de la caña de azúcar, mostraron en un corto período de tiempo, una acusada decadencia de los rendimientos agrícolas. Debiéndose en la mayoría de los casos al deterioro de la condición física del suelo.

Villegas *et al.* (1998) realizaron una evaluación del comportamiento de propiedades físicas y químicas en Ferralsoles y Vertisoles cubanos, dedicados durante un período de 66 años al monocultivo continuado con caña de azúcar. En los Ferralsoles, se determinó un incremento de la densidad del suelo (de 1.10 Mg m⁻³ en 1928 a 1.33 Mg m⁻³ en 1994) y una disminución de la porosidad total (de un 65 hasta un 49% en el mismo lapso); este comportamiento indica un aumento de la compactación de estos suelos. También se registró un incremento de la acidez, al disminuir el pH desde 6.6 en 1928 hasta 5.2 en 1994. Al mismo tiempo la materia orgánica disminuyó desde un 3.88 hasta un 2.57%. En este período, los Vertisoles mostraron un deterioro en sus propiedades químicas, al disminuir la materia orgánica desde un 4.7 hasta un 2.6% y el pH desde 6.9 a 6.3.

Un estudio realizado por Herrera y Milanés (2007), en Cambisoles y Luvisoles sin caña de azúcar (durante 15 años), con caña sin quemar y con caña quemada encontró, en los primeros 20 cm de profundidad, valores de 3.35, 2.17 y 1.80% de materia orgánica,

respectivamente. Cairo y Fundora (2005) plantean que cuando un suelo virgen comienza a ser cultivado, los niveles de materia orgánica y de nitrógeno bajan gradualmente, y pueden llegar a representar entre el 40 y el 70% de la materia orgánica contenida anteriormente. Este efecto es más marcado bajo las condiciones de clima tropical existentes en Cuba. Hernández *et al.* (2006) plantean que estos cambios suceden porque las plantas son la principal fuente de materia orgánica que se incorpora al suelo para ser transformada en humus. Además los diferentes tipos de formaciones vegetales (grupos de formaciones leñosas, transicionales leñoso herbáceas y herbáceas) aportan a la materia orgánica, en dependencia de sus características, propiedades específicas.

La vegetación influye decisivamente sobre el horizonte A, que es donde mayor contenido de materia orgánica se encuentra entre los horizontes minerales del suelo. Aquí ocurre la acumulación, descomposición, humificación y formación de compuestos acoplejados con los constituyentes minerales (Hillel, 1998; Ponce de León y Balmaseda, 1999).

Cairo y Fundora (2005) plantean que la mayor parte de la materia orgánica en el suelo tiene origen vegetal (vegetación herbácea espontánea, bosques y restos de cosechas). La distribución de la materia orgánica en el suelo está distribuida de diferentes formas, en dependencia del tipo de vegetación. A su vez, dicha vegetación influye sobre la evolución del suelo en las formas siguientes:

Por el microclima. El ambiente húmedo y umbroso de los bosques contribuye a proteger el humus, el cual se descompone rápidamente bajo el efecto de la radiación solar al desaparecer el bosque.

Por la profundidad de enraizamiento. La misma ayuda al movimiento descendente del agua con el consiguiente lavado de los coloides del suelo.

Por el humus que produce. El humus formado por la vegetación, debido a las particularidades de los restos que ingresan al suelo y por la microflora y microfauna que favorece, es un agente fundamental de la edafogénesis.

Por la protección más o menos eficaz contra la erosión. En los bosques se encuentran, generalmente, los suelos más evolucionados.

El uso del suelo tiene además una influencia determinante en los procesos de infiltración y distribución del agua en el suelo, así como en la evaporación influida por la cobertura vegetal (De *et al.* 2003). El estudio del mismo nos permite comprender las causas y consecuencias de las tendencias de los procesos de degradación, desertificación y de pérdida de la biodiversidad (Mas *et al.*, 2009).

Según Cairo y Fundora (2005) la biomasa de los bosques tropicales y subtropicales oscila entre 500-1 700 t ha⁻¹. En la vegetación herbácea, la biomasa aérea varía entre 0.5-13 t ha⁻¹, mientras que la de las raíces fluctúa entre 8-28 t ha⁻¹.

De acuerdo con el tipo de vegetación que cubre el suelo, el humus puede clasificarse en:

Humus de césped de gramíneas. Poco ácido, rico en nitrógeno y de rápida descomposición.

Humus de bosque frondoso. Medianamente ácido, descomposición bastante rápida.

Humus de bosque resinoso. Muy ácido, pobre en nitrógeno y de muy lenta descomposición.

Morales *et al.* (2006) plantean que en los suelos Ferríticos Rojos Oscuros de Pinares de Mayarí las reservas de carbono, en los primeros 20 cm, oscilan entre 90-117 t ha⁻¹ en áreas cubiertas por bosques de pinos. Al mismo tiempo donde habían ocurrido procesos de deforestación las reservas de carbono en estos suelos solo son de 58 t ha⁻¹.

Por otra parte, la caña de azúcar es una de los cultivos con mayores rendimientos en biomasa por área y unidad de tiempo (Cuéllar *et al.*, 2003). Según los datos aportados por Técnicaña (2007), en los Valles del Cauca y del Risaralda la caña de azúcar produce alrededor de 41 t ha⁻¹ de biomasa. Otros autores (Cuéllar *et al.*, 2003) plantean que, cuando se cosecha verde, la caña de azúcar aporta al suelo entre 7-10 t ha⁻¹ de biomasa.

El agua en el suelo

El suelo es un cuerpo trifásico: sólido, líquido y gaseoso (Salgado, 2001), formado por un 50%, de partículas minerales y orgánicas y otro 50% por espacios porosos ocupados por el aire y el agua en igual proporción (Rogers y Sothers, 1996; Ponce de León y Balmaseda, 1999; Salgado, 2001). Hillel (1998) considera que las tres fases del suelo representan la matriz del suelo (fase sólida), la solución del suelo (fase líquida) y la atmósfera del suelo (fase gaseosa). Esta distribución se muestra en la Figura 1.

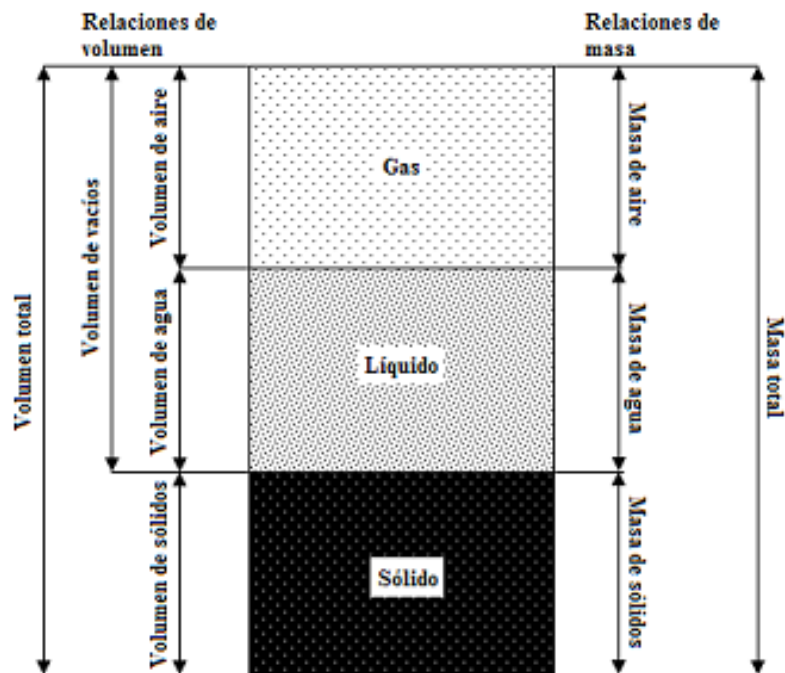


Figura 1.- Fases constituyentes del suelo con sus respectivas relaciones de volumen y masa.

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. 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 *desección* debido al consumo realizado por las plantas y a la evaporación (Jordan, 2006).

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).

Saturación. Es el agua contenida del suelo cuando casi todos los espacios entre las partículas están llenos de agua (Cartes y Vargas, 2007). En los suelos bien drenados es un estado temporal ya que el exceso de agua drena de los poros grandes por influencia de la gravedad para ser reemplazada por aire.

Capacidad de campo. Es la cantidad de agua que contiene un 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 (Aguilera y Martínez, 1996). El concepto de capacidad de campo se aplica únicamente a suelos bien estructurados donde el drenaje del exceso de agua es relativamente rápido; si el drenaje ocurre en suelos pobremente estructurados, por lo general continuará durante varias semanas y este tipo de suelos de estructura tan mala raramente tiene una capacidad de campo claramente definida. La capacidad de campo se determina mejor en el campo al saturar el suelo (Cartes y Vargas, 2007) y medir su contenido de agua después de 2 a 5 días de drenaje. Es una constante característica de cada suelo, pues depende de la textura, el contenido de materia orgánica y el grado de compactación (Aguilera y Martínez, 1996). El agua está retenida a -0.33 atm (Rogers y Sothers, 1996).

Punto de marchitez permanente. Es el contenido de humedad de un suelo en el que las plantas no pueden reponer el agua suficiente para recuperar su turgencia (Aguilera y Martínez, 1996). En esas condiciones, el cultivo está permanentemente marchito y no puede revivir cuando se le coloca en un medio saturado (Cartes y Vargas, 2007). El agua en este punto se encuentra retenida a -15 atm (Rogers y Sothers, 1996, Jaramillo, 2002).

Agua disponible. Es 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 (Jaramillo, 2002).

Humedad higroscópica. Es el agua retenida en el suelo, a -30 atm, cuando se seca al aire (Jaramillo, 2002).

Clasificación física del agua

Según Cairo y Fundora (2005), los estudios realizados a las propiedades hidrofísica de los suelos demuestran 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:

Agua gravitacional o libre. Es el agua que se mantiene momentáneamente en los macroporos después de los períodos de lluvia o del riego. Está regida por la fuerza de gravedad y aumenta su velocidad a medida que aumenta el volumen de los espacios interagregados por donde se mueve. Es un agua de mucho movimiento y rapidez, pero puede llegar a no a percolar cuando el suelo está saturado. Está retenida a tensiones inferiores a 0.1 -0.5 atm.

Agua capilar. Es la que llena los espacios capilares más finos e intermedios y queda después de que el agua gravitacional percola en el suelo. Se encuentra retenida en el suelo entre la capacidad de campo (-0.33 atm) y la humedad higroscópica (-31 atm).

Agua higroscópica. Es el agua absorbida por el suelo en dependencia de las condiciones atmosféricas. No puede ser asimilada por las plantas porque se encuentra en estado gaseoso (vapor de agua).

Agua molecular. Se encuentra en la superficie de las partículas sin disolver los cuerpos solubles.

Agua de combinación o de constitución. Forma parte del suelo como constituyente de su estructura molecular. No se desprende por desecación. Debido al lazo de unión que existe entre esta agua y los elementos minerales no puede ser utilizada por las plantas. Desde el punto de vista de la dinámica del agua en el suelo, puede considerarse como si no existiera.

No obstante, estos autores reconocen que no existe una definición exacta que permita delimitar la condición del agua en el suelo.

Clasificación biológica del agua

Según Aguilera y Martínez (1996) el agua desde el punto de vista de su aprovechamiento por las plantas puede clasificarse en:

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.

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.

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.

La relación entre las clasificaciones física y biológica del agua se representa en la Figura 2.

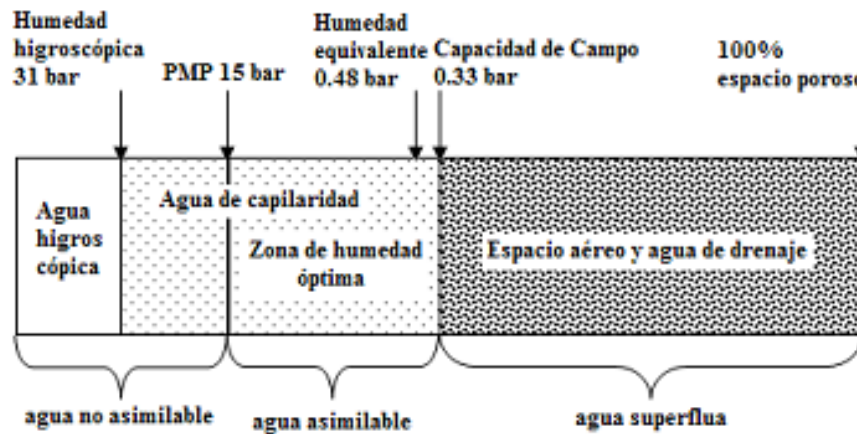


Figura 2.- Relación entre la clasificación física del agua y la biológica y las tensiones a que se encuentran retenidas.

Propiedades hidráulicas de los suelos

El primer escalón para la utilización de los modelos agrológicos que predicen la retención y el movimiento del agua en el suelo es la determinación de las propiedades hidráulicas de estos (Bardossy y Lehmann, 1998; Ruíz *et al.*, 2006; Landini *et al.*, 2007; Vereecken *et al.*, 2008). Lo cual es de gran importancia pues la subsistencia de las plantas depende de la utilización que estas hagan del agua contenida en el sistema suelo-planta-agua (Giráldez *et al.*, 2011).

En Cuba y en el mundo son numerosos los autores de han dedicado al estudio de este tema (Ruíz *et al.*, 1992; Medina *et al.*, 2000; Torres, 2000; Ruíz *et al.*, 2006; Weinzettel *et al.*, 2007; Hernández y Muñoz, 2009; Ghanbarian-Alavijeh y Millán, 2010; Terleev *et al.*, 2010; Moret *et al.*, 2011; Sławiński *et al.*, 2011).

Métodos utilizados para determinar las propiedades hidráulicas

Para la determinación de las propiedades hidráulicas de los suelos, según Ruíz *et al.* (2006), se utilizan la curva tensión-humedad (relación entre la humedad volumétrica y el potencial matricial del agua en el suelo) y la función conductividad hidráulica.

El valor del potencial matricial o mátrico está relacionado con la altura que alcanza una columna de agua en el suelo y ésta altura varía inversamente con el radio del poro. Mientras menor es la dimensión del poro, mayor será la altura de la columna de agua y

mayor es la fuerza con la cual es retenida el agua por los poros del suelo (Jaramillo, 2002).

Curva tensión-humedad, curva característica o curva de retención de humedad

La curva tensión-humedad es la relación entre el contenido de humedad, expresado en valores volumétricos, y el potencial matricial del suelo (Rucks *et al.*, 2004; Ruíz *et al.*, 2006; López *et al.*, 2010). La misma es un aspecto importante a tener en cuenta a la hora de establecer las necesidades de riego y drenaje en un área determinada (Fooladmand y Habibi, 2012). La forma de la curva característica depende, entre otros factores, del manejo agrícola que se lleve a cabo (Green *et al.*, 2003).

Tiene gran importancia desde el punto de vista agrícola, pues se utiliza para determinar la cantidad de agua disponible en el suelo; estimar determinados valores característicos de la relación suelo-planta-agua, como es el caso de la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente; clasificar los suelos; detectar cambios en la estructura del suelo y determinar la relación entre la tensión de la humedad del suelo y otras propiedades físicas (Stakman, 1980). Además, resulta esencial a la hora de interpretar y predecir los cambios en la cobertura vegetal, sobre todo cuando esta ocurre como resultado de una sucesión natural (Kalicka *et al.*, 2008).

La curva tensión-humedad puede ser determinada *in situ* o en el laboratorio, con muestras alteradas o inalteradas. En el campo puede establecerse mediante la utilización de los tensiómetros, TDR y sonda de neutrones. Uno de los métodos más usados en el laboratorio es la olla de Richards.

El número de puntos determinados analíticamente para graficar una curva resulta muy escaso debido al trabajo y costos requeridos. Por esta razón es necesaria la utilización de una función analítica para ajustar los puntos observados y estimar los puntos intermedios entre dichos puntos (Nielsen *et al.*, 1986). De los modelos más utilizados a nivel mundial se pueden mencionar el de Brooks y Corey, elaborado de conjunto por ambos investigadores entre 1964 y 1966, los de King, Brutsaert, Visser y Taylor y Luthin, que aparecieron durante la segunda mitad de esa misma década y los modelos construidos, a partir de 1970, por Gardner, Campbell, Vauclin y Van Genuchten (Ruíz, *et al.*, 2002).

Los trabajos de Ruíz *et al.* (1992) y Ruíz *et al.* (2006) señalan al modelo de Van Genuchten como el de mejor ajuste para las curvas características correspondientes a diferentes agrupamientos de suelos cubanos. También fue utilizado con éxito por Dane (1980), Nielsen *et al.* (1983) y Van Genuchten y Nielsen (1985).

En el mundo esta ecuación es utilizada con éxito para determinar el comportamiento de las propiedades hidráulicas en diferentes tipos de suelos (Ruíz *et al.*, 1992; Almeida *et al.*, 2005; Pinto *et al.*, 2006; Ruíz *et al.*, 2006; Anunciato *et al.*, 2008; Silva *et al.*, 2008; Czyż y Dexter, 2009). Igualmente puede ser aplicada en el caso específico de los Oxisoles (Ruíz *et al.*, 2002; Loyola y Prevedello, 2003; Vieira *et al.*, 2006; Gontijo *et al.*, 2008; Silva *et al.*, 2012). La ecuación matemática que describe el modelo expresa que:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + \alpha h^n)^m}$$

Donde θ_r es la humedad residual; θ_s la humedad de saturación; h es la tensión de burbuja; α , n y m parámetros de ajuste. En la mayoría de los casos se asume que:

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

Algunas propiedades de los suelos que influyen en el comportamiento de la curva tensión-humedad

Las propiedades del suelo tienen una notable influencia en el balance del agua contenida en el mismo. El conocimiento de estas propiedades, de su comportamiento bajo diferentes condiciones edáficas y la forma en que regulan la circulación hídrica, es de particular importancia en las áreas dedicadas a usos agrícolas para lograr un adecuado manejo de los recursos hídricos y alcanzar un desarrollo sustentable a través de un manejo agrotécnico y uso de la tierra adecuados. En las áreas agrícolas las propiedades hidráulicas de los suelos pueden cambiar por las labores de preparación de tierra y el impacto debido a la modificación de las propiedades físicas tales como densidad y estructura del suelo (Lipiec *et al.*, 2007; Czyż y Dexter, 2009).

Estructura del suelo

La estructura es la forma en que los elementos constitutivos del suelo tienden a unirse entre sí (Mela, 1970; Warkentin, 2008) para formar unidades mayores conocidas como agregados (Ponce de León y Balmaseda, 1999). Según Pelegrín *et al.* (1990) el estado de la estructura condiciona el tamaño y la distribución de los macroporos y, por ende, el movimiento y retención del agua.

Con respecto a la estructura coexisten tres concepciones diferentes: una físico-química otra genético-morfológica y, por último, la agronómica. La primera de ellas incluye la floculación progresiva de las partículas de suelo, que comienza desde la agregación de los coloides hasta la formación de agregados mayores, la segunda plantea que no existen suelos sin estructura, pues cada tipo la adquiere durante su génesis; la cual sirve, además, para identificarlos. En el caso del concepto agronómico se entiende por suelo estructurado aquel en el que se encuentra en mayor proporción los agregados entre 0.25 y 10 mm; y se consideran como una mezcla inexacta los que se encuentran fuera de este rango. En los procesos de agregación influyen el contenido de arcilla, el tipo de arcilla, los iones intercambiables, los cementantes inorgánicos, los compuestos y cementantes orgánicos, el aire, la temperatura, la presión y el agua (Hernández *et al.*, 2010).

Una buena estructura en el horizonte A evita el sellado de los poros y el encostramiento superficial, posibilita la germinación de las semillas y permite la infiltración del agua. Al aumentar la infiltración disminuye, junto con la escorrentía, la erosión hídrica, lo que trae consigo el aumento de las reservas de agua. Con respecto al espacio poroso permite la circulación del agua, aire y nutrientes, eleva la conductividad hidráulica y favorece la actividad de la microfauna y mesofauna del suelo, además facilita la penetración de las raíces. Disminuye la compactación del suelo, lo que alivia el laboreo, favorece la disminución de la densidad del suelo y mejora el desarrollo radicular (Jordan, 2006).

Tipos de estructura

La estructura del suelo se clasifica de acuerdo a su morfología, el tamaño y el grado de fragmentación (Hernández *et al.*, 2010). Según su morfología, los suelos se clasifican en: sin estructura, con estructura o con la estructura destruida en lodos. En el primer

caso mencionado la misma puede ser de grano simple, típico de suelos con un alto porcentaje de arena; o masiva, cuando los agregados se unen entre sí, sin líneas de separación bien establecidas, debido a pequeñas cantidades de arcillas o materiales orgánicos. Las margas arenosas, arenas margas y polvo margoso son ejemplos comunes de suelos sin estructura masiva (Cairo y Fundora, 2005).

En los suelos con estructura esta puede ser cúbica en bloques angulares y subangulares, nuciforme, granular o grumosa; prismática, la cual puede ser prismatizada y también columnar. Por último tenemos la estructura enlosada, que puede ser estratificada o laminar. De acuerdo al tamaño se clasifican en terrón, cuando es de forma irregular y grande; grumo, cuando es menor de 10 mm, redondeado, poroso y rico en materia orgánica; al ser menores de 0.2 mm se conocen como gránulos. El grado de fragmentación se cataloga como gruesa y es característica de suelos con altos contenidos de arcillas 2:1. En los suelos de fragmentación media predominan las arcillas 2:1, con influencia del calcio y la cohesión debilitada por la materia orgánica. En los suelos donde predominan las arcillas 1:1 o arcillas hidróxidos, en las que el hierro tiene un papel fundamental, la fragmentación es fina (Hernández *et al.*, 2010).

Las estructuras granular y migajosa forman agregados pequeños, esferoidales, que no se ajustan con los terrones adyacentes y se localizan en el horizonte A. En términos relativos, la primera es menos porosa que la segunda. Cuando los agregados forman placas y sus dimensiones verticales son menores que las horizontales, superponiéndose hasta dificultar la infiltración del agua en el suelo, se denomina laminar (Meyer *et al.*, 2011). Esta estructura aparece, en áreas bajo bosque o suelos arcillosos, en el horizonte A2.

La estructura blocosa se manifiesta cuando los agregados están limitados por otros agregados cuyas caras bien definidas forman el molde de estos; los bloques subangulares tiene las aristas más redondeadas. Las estructuras en forma de bloques se localizan en el horizonte B. Los agregados que tienen una estructura prismática son similares a columnas y al igual que en el caso de los bloques, las paredes de los otros agregados forman el molde y también se localizan en el horizonte B (Aguilera y

Martínez, 1996). La estructura columnar se caracteriza por tener sus dimensiones verticales mayores que las horizontales (Meyer *et al.*, 2011). Las columnas están separadas por grietas verticales y generalmente resquebrajadas por grietas horizontales las caras de las columnas son redondeadas. Son características del horizonte B de los suelos con problemas de sodicidad (Aguilera y Martínez, 1996).

Textura

La textura está dada por la proporción relativa de los tamaños de varios grupos de partículas de la parte mineral un suelo (Mela, 1970; Ponce de León y Balmaseda, 1999; Hernández *et al.*, 2006). La fracción granulométrica que más abunda es la que determina el tipo de textura y de ella dependen la aireación, el movimiento del agua en el suelo, la capacidad de intercambio catiónico y la absorción de nutrientes (Aguilera y Martínez, 1996).

Se dice que una textura es adecuada cuando permite el óptimo desarrollo vegetal. De esta manera, Rucks *et al.* (2004) plantean que un suelo tiene una buena textura cuando la relación entre los diferentes tamaños de partículas le permiten a las plantas fijar las raíces y realizar la nutrición. Estos autores señalan que de acuerdo al tamaño existen tres grupos principales: arena, limo y arcilla.

La arena está constituida por partículas minerales sólidas de tamaño comprendido entre 2.00- 0.02 mm (Ponce de León y Balmaseda, 1999). Es la fracción más grande del suelo, compuesta principalmente por granos de cuarzo más o menos meteorizados (Rucks *et al.*, 2004). La arena no tiene capacidad de agregación; además, una gran proporción de arena en el suelo da lugar a poros numerosos y relativamente grandes. Los principales minerales que la constituyen son el cuarzo, los feldespatos, las plagioclasas, entre otros. Los granos de esta fracción son visibles y se pueden observar individualmente (Casanova *et al.*, 2004). Su capacidad de intercambio catiónico es baja. Su principal función es la composición de la matriz del suelo.

El limo agrupa las partículas de un tamaño comprendido entre 0.02 y 0.002 mm. La cualidad más notable es su apariencia suave, sedosa en estado húmedo y polvosa en estado seco (Jaramillo, 2002). Su composición química es semejante a la de la arena

(Casanova *et al.*, 2004), y al igual que esta, no tiene capacidad de agregación. No sufre expansión ni contracción y su capacidad de intercambio catiónico es baja.

La arcilla es la fracción más pequeña, su tamaño es inferior a 0.002 mm (Meyer *et al.*, 2011) y posee propiedades físicas y químicas especiales, entre las que se encuentran una mayor superficie específica, poder absorbente, plasticidad y cohesión.

En ella predominan los minerales secundarios como la caolinita, illita, montmorillonita y vermiculita (Rucks *et al.*, 2004); pues, según Jordan (2006), mientras que las fracciones mayores son el producto de la disgregación física de la roca madre, la arcilla proviene de la alteración química del material originario. Esta es la causa de las diferencias mineralógicas entre las mismas. Las arcillas, además, tienen la capacidad de flocularse, por lo que no se comportan como partículas individuales en el suelo.

Clasificación textural de los suelos

La designación de un suelo, en la que se tiene en cuenta su textura, se denomina clase textural, y está determinada por la proporción de la masa de cada una de las tres texturas (Hillel, 1998). Cada una de las cuales se comporta de forma diferente, y su influencia en el tipo de clase textural no depende totalmente de su proporción en el suelo. En el caso de la arcilla su incidencia es mucho mayor que la del limo o la arena, por lo que en pequeñas cantidades se hace sentir de inmediato.

La *textura arcillosa* se encuentra en suelos plásticos, con condiciones difíciles de laborabilidad. Debe poseer más de un 40% de arcillas. Las fracciones de arena y limo deben estar por debajo del 45 y el 40%, respectivamente (Soil Survey Staff, 1993). Al realizar la preparación de tierra en condiciones de humedad excesiva se forman grandes terrones, que impiden la adecuada germinación de las plantas. Al contrario, en condiciones de sequía son muy compactos, con una alta consistencia, y se destruye la estructura. En condiciones de humedad alternante, la capa pulverulenta que queda, se convierte en una costra densa y compacta superficial. También pueden formarse por el efecto del paso de la maquinaria agrícola, capas muy compactas por debajo de la profundidad de labor, conocidas como “piso de arado”, que dificultan la infiltración del agua y el desarrollo de las raíces.

En los suelos con una *textura limosa*, es frecuente que ocurra el apelmazamiento de los mismos, lo que provoca dificultades en la circulación del aire y del agua. Son suelos con una mala estructura, en los que son frecuentes la aparición de encostramiento superficiales. Jordan (2006) señala que estos suelos no son muy frecuentes, y que se limitan a zonas de acumulación de material transportados por procesos aluviales. Según el Soil Survey Staff (1993) el contenido de limo debe ser superior al 80%.

Por otro lado cuando en la superficie predomina la *textura arenosa*, los suelos son ligeros, con una escasa plasticidad y poca consistencia (Ponce de León y Balmaseda, 1999), por lo que no existen las dificultades en la preparación de tierra propias de los suelos pesados. Se caracterizan por presentar una buena aireación, debido al tamaño y la abundancia de los macroporos, lo que también favorece la velocidad de infiltración (Casanova, 1994). En los suelos arenosos la proporción de las fracciones debe ser del 85% o más para la arena (Soil Survey Staff, 1993).

Los suelos de *textura franca* tienen las propiedades favorables de las clases anteriores, sin sufrir por sus características negativas (poca tenacidad, compacidad y estructuración, baja retención de humedad y lenta circulación del agua y el aire), por lo que esta sería la textura ideal para los suelos (Cairo y Fundora, 2005).

Densidad del suelo

Salgado (2001) plantea que la densidad de la fase sólida o real (Dfs) representa la masa de las partículas por unidad de volumen de sólidos. Mientras que la densidad del suelo o aparente (Ds) se refiere a la masa de suelo seco por una unidad de volumen de suelo.

La densidad del suelo puede verse afectada por la textura, la estructura, la compactación, el laboreo y la materia orgánica (Cairo y Fundora, 2005). La compactación del suelo provoca el aumento de la densidad del suelo, de la resistencia mecánica y disminuye la porosidad del mismo (Taboada y Micucci, 2009; Villamil *et al.*, 2000). Otros autores (Defosse y Richards, 2002) agregan que también puede causar considerable daños a la estructura de los suelos con la consiguiente afectación a los rendimientos agrícolas, a la laborabilidad del suelo y al medio ambiente.

Con respecto a la densidad del suelo, la Dirección General de Suelos y Fertilizantes (1984) plantea que puede clasificarse como **muy baja** cuando está por debajo de 1.00 Mg m^{-3} ; **baja** cuando oscila entre $1.00\text{-}1.20 \text{ Mg m}^{-3}$; **mediana** entre 1.20 y 1.45 Mg m^{-3} ; **alta**, al variar dentro de un rango de 1.45 y 1.60 Mg m^{-3} y **muy alta** cuando supera los 1.60 Mg m^{-3} . Estos mismos autores plantean que, en el caso de la densidad de la fase sólida, los minerales secundarios presentan valores muy superiores a los encontrados en la materia orgánica, donde la *Dfs* es de 1.37 Mg m^{-3} ; mientras que en la caolinita, la goetita y la hematita, los rangos oscilan entre $2.0\text{-}2.5$, $3.3\text{-}4.3$ y $4.9\text{-}5.3 \text{ Mg m}^{-3}$, respectivamente.

Porosidad del suelo

La porosidad total es la porción del volumen total del suelo que se encuentra ocupada por los poros (Salgado, 2001). Dentro del espacio poroso se pueden distinguir los macroporos y microporos. Los macroporos no retienen el agua contra la fuerza de la gravedad, y son los responsables del drenaje y la cantidad de aire contenido en el suelo. La macroporosidad constituye también la mayor parte del espacio en el que crece el sistema radical. Los microporos son los que retienen agua, parte de la cual es disponible para las plantas. La porosidad total o espacio poroso del suelo, es la suma de macroporos y microporos. Las características del espacio poroso, dependen de la textura y la estructura del suelo (Rucks *et al.*, 2004). El tamaño de los poros influye en los distintos procesos edáficos como son la infiltración, el almacenamiento de agua, el drenaje, el intercambio gaseoso y la resistencia al desarrollo radicular (Castiglioni *et al.*, 2010).

Una alta porosidad resulta enormemente favorable para las plantas, pues facilita el enraizamiento, ayuda a la conservación del agua y posibilita un mejor intercambio entre las raíces y el suelo. Para que el suelo tenga una buena aireación y retención de agua, la porosidad debe encontrarse entre el 40-60%. Por debajo de este rango pueden asfixiarse las raíces. Por encima del límite máximo se dificulta el contacto entre las raíces de las plantas y el suelo. En condiciones naturales de estructura del suelo, la macroporosidad es mayor que en áreas sometidas a la influencia antrópica, pues las

diferentes labores agrícolas provocan una notable disminución de la porosidad de aireación con efectos negativos para el volumen de aire del suelo (Spera *et al.*, 2004).

La macroporosidad, o porosidad ocupada por el aire, está formada por los poros más grandes que, como su nombre lo indica, están ocupados frecuentemente por aire. A menudo se presentan en forma de grietas que separan los agregados e incluso penetran en los mismos. Su importancia depende sobre todo de la estructura del suelo, del nivel de agrietamiento y, en cierta medida, de la textura. Es más elevada en suelos arenosos. La microporosidad o porosidad ocupada por el agua depende también de la estructura pero sobre todo de la textura y de la actividad biológica. Es mayor en suelos arcillosos y en aquellos donde existe una microfauna numerosa y activa (Cairo y Fundora, 2005).

La porosidad depende de la textura, de la estructura y de la actividad biológica del suelo. Mientras más gruesas son las partículas, mayores son los espacios entre ellas. Por ello, es normal que los suelos arenosos presenten poros gruesos y los suelos limosos y arcillosos, poros muy numerosos pero de pequeño tamaño. La influencia de la estructura es tan evidente que a menudo se utiliza el valor de la porosidad para dar una idea de la estructura del suelo; además los agentes que destruyen la estructura, como por ejemplo el apisonado, disminuyen la porosidad. En los suelos cuya actividad biológica es intensa se observa con frecuencia, al lado de las huellas del recorrido de las lombrices, un gran número de galerías muy finas, debidas a la labor de los artrópodos. Cuando este tipo de poros resulta predominante se dice que el suelo tiene una porosidad tubular (Cairo y Fundora, 2005).

La porosidad total puede evaluarse como muy alta cuando es mayor del 63%, alta cuando oscila entre 55-63%, mediana al encontrarse entre el 45-55%, baja al variar entre el 40-45% y muy baja cuando está por debajo del 40% (Dirección General de Suelos y Fertilizantes, 1984).

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. El humus es la principal fuente de energía para los microorganismos (Jaramillo, 2002).

Influencia en la retención de humedad del suelo

La distribución de las partículas según su tamaño (textura) y el ordenamiento de las mismas (estructura) son las principales propiedades físicas que rigen el comportamiento de la curva tensión-humedad. Además el carácter hidrófilo de componentes de la materia orgánica influye de manera directa sobre la CTH, e indirectamente a través de su influjo en la estructura del suelo.

La cantidad de agua retenida a bajas tensiones (inferiores a $pF=2.00$), está influenciada fundamentalmente por la capilaridad y la distribución de las partículas, o sea por estructura del suelo. Para tensiones superiores (pF entre 2.00-4.18), la retención de agua está dada fundamentalmente por la absorción, por ende, mucho más influenciada por la textura del suelo. De esta manera, mientras mayor sea el contenido de arcilla, mayor será el contenido de agua retenida en el suelo a una determinada tensión. Dicho de otra forma, en dos suelos, uno arenoso y otro arcilloso, la misma cantidad de agua está más fuertemente retenida en aquel donde predomine la arcilla. En el caso del primer suelo, en todas las tensiones, el contenido de agua será menor al compararlo con el segundo; también los suelos arenosos pierden humedad a una velocidad muy alta en todas las tensiones (sobre todo en las bajas), mientras que en los arcillosos esta velocidad es más baja durante un rango de tensión muy amplio.

De esta forma, algunos autores han utilizado métodos indirectos (funciones de pedotransferencia) para determinar la curva tensión-humedad, mediante propiedades físicas más fáciles de definir.

MATERIALES Y MÉTODOS

Características de la zona

El estudio se llevó a cabo durante el 2022, en áreas pertenecientes a Pinares de Mayarí, situado en el Altiplano de Nipe el cual, con una altura por encima de los 600 msnm, y unos 25 km de ancho de este a oeste por 45 km de norte a sur, se encuentra ubicado en el municipio de Mayarí, provincia de Holguín. Limita al norte y al oeste con la Llanura de Alto Cedro, al este con la cuenca del río Mayarí y al sur con la del río Cauto (Figura 3).

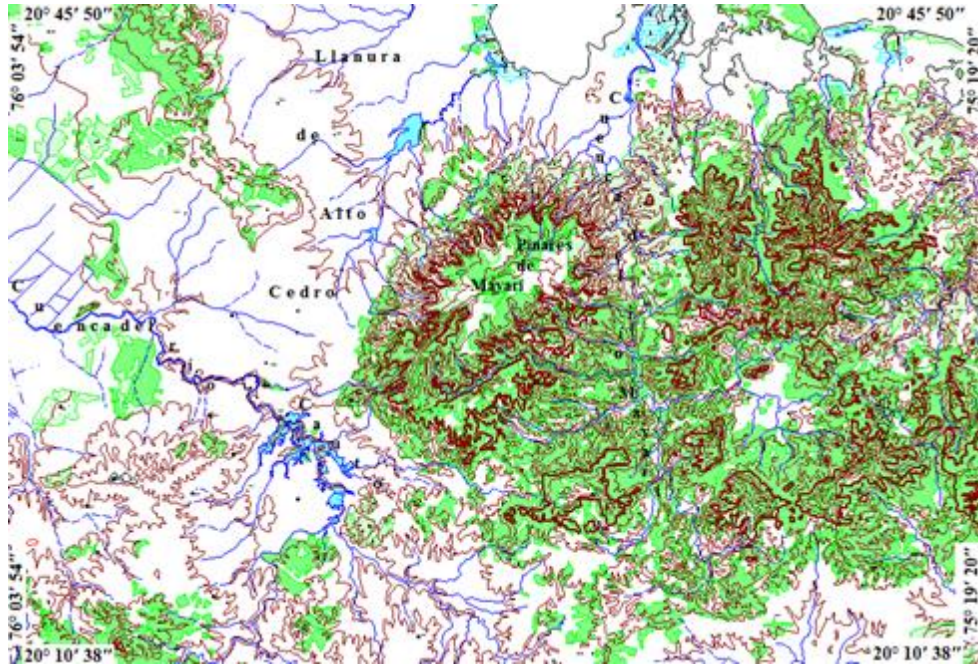


Figura 3- Límites geográficos de Pinares de Mayarí (1:450 000).

La vegetación está formada, fundamentalmente, por relictos de bosques tropicales latifolios perennifolios. (Marín *et al.*, 1991). La especie más común es el pino de Mayarí (*Pinus cubensis*). Bennett y Allison (1966), reportaron en 1928 que la vegetación en Pinares de Mayarí consistía de pinos y vegetación herbácea, con algunos bosques de latifolias en galería a lo largo de los ríos, llegando a existir, en determinados lugares, una vegetación de bosques lluviosos a pluvisilvas (Smith, 1953; Instituto de Suelos, 1973). El principal cultivo comercial es el café (Marín *et al.*, 1991).

Los suelos Ferríticos Rojos Oscuros típicos son predominantes en Pinares de Mayarí, donde ocupan una extensión de 169.603 km² (Figura 2.2). Ocupan la parte montañosa del relieve, con una pendiente que va desde ondulada a fuertemente alomada. En menor superficie aparecen otros tipos de suelo como los Ferralíticos Rojos, Fersialíticos Pardos Rojizos, Fersialíticos Rojos, Pardos, Húmicos Calcimórficos, Rendzinas, Fluvisoles y Litosoles.

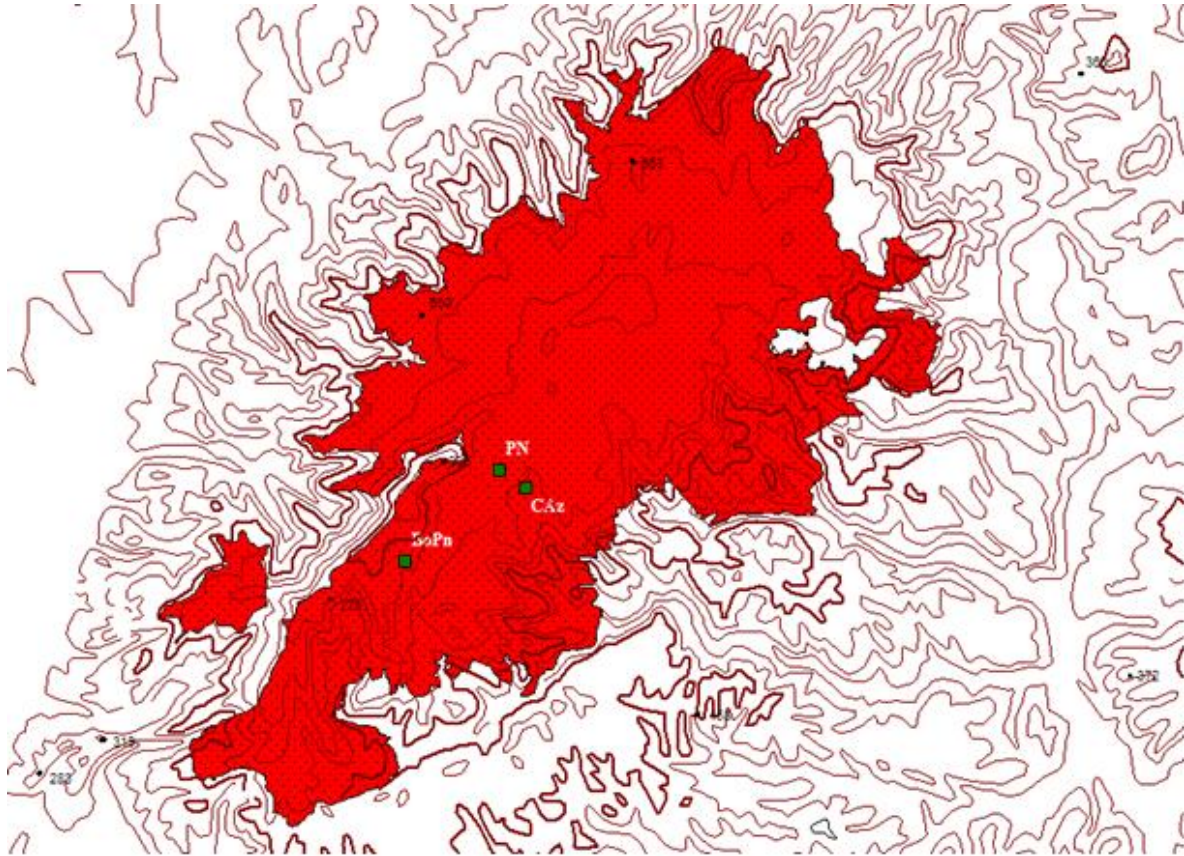


Figura 4.- Área ocupada por los suelos Ferríticos Rojos Oscuros típicos en Pinares de Mayarí (1:15 000).

La temperatura media en la zona es de 21.4° C, con una precipitación promedio anual de 1 688 mm. Existe un período muy lluvioso, con precipitaciones promedio mensuales superiores a los 100 mm entre los meses de abril a noviembre, con dos picos bien definidos en mayo y septiembre; y un periodo menos lluvioso comprendido entre diciembre y marzo

Descripción de los usos de la tierra

Se seleccionaron tres usos de la tierra por la extensión superficial que representan dentro de la subregión geográfica del Altiplano de Nipe, específicamente en Pinares de Mayarí. Se tuvo en cuenta a la caña de azúcar para compararla con el pasto natural, por la composición y deposición atípica de los restos vegetales (como gramínea). Los usos estudiados fueron:

Caña de azúcar. El área escogida forma parte del lote de floración perteneciente a la Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar (EPICA) de Holguín, fue plantado, en noviembre de 1986, en áreas cercanas a la Estación Integral de Investigaciones de Montaña. Ubicado a los 20° 28' 58.08" de latitud N y 75° 47' 15.36" de longitud W. Al SSE de la Loma de La Mensura. El suelo se encuentra poco humificado, con una pendiente predominante de un 5%.

Pasto natural. Se encuentra ubicado frente a la Estación Integral de Investigaciones de Montaña, a un costado de la carretera Mayarí-Mella. Ubicado a los 20° 29' 13.92" de latitud N y 75° 47' 39.84" de longitud W. Al E de la Loma de la Mensura, con al menos 38 años de establecido. El suelo está poco humificado y presenta una pendiente predominante de un 7%. Constituye un área abierta que fue destinada a la ganadería y ahora en algunas partes se observa una vegetación arbustiva secundaria.

Bosque de pinos. Su ubicación es carretera Mayarí-Mella. A los 20° 27' 55.44" de latitud N y 75° 49' 8.04" de longitud W. Al SSW de la Loma de La Mensura. Es un bosque virgen, con el suelo medianamente humificado, donde la pendiente predominante es del 35%. Posee un estrato arbóreo dominado por *Pinus cubensis*, con una altura de 17 m, un sotobosque y un estrato herbáceo. Las lianas son escasas y se encuentran también algunas epífitas.

Muestreo de suelos

En cada uno de los sitios escogidos se montó una parcela de 50x50 m, en la que se superpuso una rejilla más densa formada por 50 subparcelas de 5x10 m. Una vez conocidas la cantidad y el orden de las mismas, se eligieron 5 subparcela en cada uso de la tierra de forma aleatoria.

Los muestreos se realizaron en el centro de cada una de ellas a la profundidad de 0-15 cm, que coincidió con el horizonte A1, sobre el que los usos de la tierra ejercen su mayor influencia.

Curva tensión-humedad

Para la determinación de la humedad volumétrica a las tensiones -1,- 5 y -9 kPa se colocaron las muestras en la caja de arena (Eijkelkamp), y luego en la olla de Richards

(también Eijkelkamp), a los potenciales matriciales de -33, -100, -300 y -1 500 kPa con muestras tomadas en los cilindros con anillos de 2 cm de alto. Los parámetros de ajuste de la curva se estimaron mediante el modelo analítico de van Genuchten (1980) a través del software RECTS 6.0:

$$\theta(h) = \theta_{RES} + \frac{\theta_{SAT} - \theta_{RES}}{[1 + (\alpha h)^n]^m}$$

En el que θ_{RES} es la humedad residual, θ_{SAT} la humedad de saturación, α y n son parámetros de ajuste y h es la tensión. Además, se tuvo en cuenta la restricción de Mualem (1976):

$$m = 1 - \frac{1}{n}$$

En cada uno de los usos de la tierra fueron calculados los siguientes indicadores estadísticos, con el fin de validar los datos obtenidos.

Desviación media (mean deviation, MD): fue calculada por la siguiente ecuación:

$$MD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta i_e - \theta i_m$$

Donde:

n : Número de pares de datos.

θi_e : Humedad del suelo estimada por el modelo.

θi_m : Humedad del suelo determinada experimentalmente.

Se utilizó para analizar la tendencia a subestimar o sobreestimar los valores predichos por el modelo de van Genuchten. La desviación media (MD) puede oscilar en un rango de $-\infty$ a $+\infty$. Cuando la desviación media se encuentra por debajo de cero los valores determinados experimentalmente se encuentran sobreestimados y por encima de cero, dichos valores fueron subestimados. El valor óptimo de MD es cero; mientras más baja sea la magnitud de sus valores, mayor será la exactitud de la estimación realizada por el modelo analítico empleado.

Raíz del cuadrado de la desviación media (root mean square deviation, *RMSD*): fue obtenido por la ecuación:

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_{i_e} - \theta_{i_m})^2}$$

Donde:

n : Número de pares de datos.

θ_{i_e} : Humedad del suelo estimada por el modelo.

θ_{i_m} : Humedad del suelo determinada experimentalmente.

Índice de Eficiencia Nash-Sutcliffe (Nash-Sutcliffe Efficiency Index, *EF*): calculado por la siguiente ecuación:

$$EF = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{i_e} - \theta_{i_m})^2}{\sum_{i=1}^n (\theta_{i_m} - \theta_{mean_m})^2} \right]$$

Donde:

n : Número de pares de datos.

θ_{i_m} : La i -enésima observación de la humedad del suelo determinada experimentalmente.

θ_{i_e} : La i -enésima observación de la humedad del suelo estimada por el modelo.

θ_{mean_m} : La media de la humedad del suelo determinada experimentalmente.

El índice de eficiencia Nash-Sutcliffe determina la magnitud relativa de la varianza residual con la varianza de los datos observados. Esta magnitud tiene un valor óptimo igual a 1.0, los valores entre 0 y 1 generalmente se consideran aceptables. Se consideran inaceptables los valores por debajo de cero, pues de esta forma, la media de los valores determinados experimentalmente es mejor que la de los estimados por el modelo.

Índice de concordancia (index of agreement, *d*): fue calculado por la siguiente ecuación:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\theta_{i_m} - \theta_{i_e})^2}{\sum_{i=1}^n (|\theta_{i_e} - \theta_{mean_m}| + |\theta_{i_m} - \theta_{mean_m}|)^2} \right]$$

Donde:

n : Número de pares de datos.

θ_{i_m} : La i -enésima observación de la humedad del suelo determinada experimentalmente.

θ_{i_e} : La i -enésima observación de la humedad del suelo estimada por el modelo.

θ_{mean_m} : La media de la humedad del suelo determinada experimentalmente.

El índice de concordancia es una medida estandarizada del grado de error de la predicción del modelo, en un rango desde 0 hasta 1. Cuando $d=1$, existe una concordancia perfecta entre los valores determinados experimentalmente y los estimados por el modelo; en sentido contrario, cuando $d=0$, nos indica falta de concordancia entre las variables. Este índice ha sido utilizado por Buske *et al.* (2013); Sales *et al.* (2014).

Se realizó, además, un Análisis de Varianza de clasificación simple mediante la prueba de rangos múltiples de Duncan a un 95% de probabilidad, para determinar si el conjunto de tratamientos considerados produce un efecto estadísticamente diferenciado en cuanto al comportamiento de los mismos en cada una de las variables analizadas. En el análisis estadístico se utilizó el software Statistica 7.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra que el valor de la desviación media (MD) fue, en los usos de la tierra *Pasto natural* y *Bosque de pinos*, igual a cero. En el caso de *Caña de azúcar*, la desviación media es ligeramente superior a cero, por lo que los valores determinados experimentalmente se encuentran subestimados en la base de datos. En cuanto a la raíz del cuadrado de la desviación media ($RMSD$), los valores obtenidos en los tres usos de la tierra se encuentran en un rango de entre 0.011-0.056 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$. El índice de eficiencia (EF) Nash-Sutcliffe se considera aceptable en los tres usos de la tierra.

Además, en los casos de *Bosque de pinos* y *Pasto natural*, este indicador se encuentra más cercano a su valor óptimo ($EF=1$). El índice de concordancia (d) nos muestra que no existe falta de concordancia entre la humedad determinada experimentalmente y la estimada por el modelo en ninguno de los tres usos de la tierra, y que la mayor concordancia se encontró en los usos *Bosque de pinos* y *Pasto natural*.

Tabla 1.- Valores de los indicadores estadísticos utilizados para validar el modelo.

Usos de la tierra	Desviación media	Raíz del cuadrado de la desviación media	Índice de Eficiencia Nash-Sutcliffe	Índice de concordancia
Caña de azúcar	0.001	0.056	0.894	0.972
Pasto natural	0.000	0.012	0.989	0.997
Bosque de pinos	0.000	0.011	0.992	0.998

La Figura 5 muestra la relación entre la humedad determinada experimentalmente y la estimada por el modelo de van Genuchten. En el uso *Caña de azúcar* se observó el más bajo valor del coeficiente de correlación. El coeficiente de correlación de Pearson entre el contenido de humedad observado y el estimado ha sido utilizado por Korus *et al.* (2007); Reichert *et al.* (2009); Terleev *et al.* (2010).

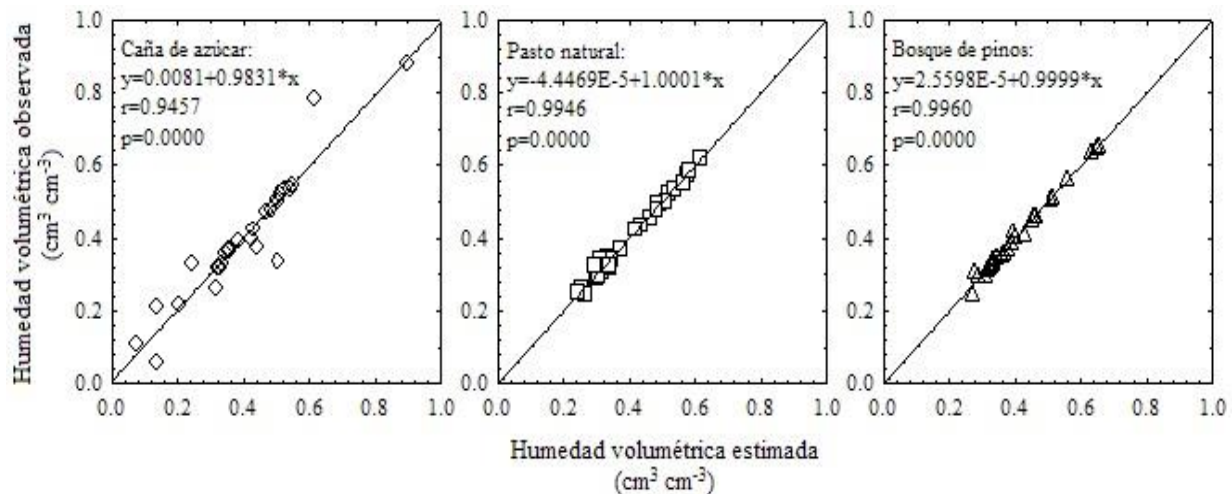


Figura 5.- Comparación de los resultados observados en el laboratorio con los estimados por el modelo de van Genuchten.

Estos últimos, al comparar el contenido de humedad observada con la estimada en curvas tensión humedad, obtenidas mediante el modelo de Van Genuchten en Gleysoles, Luvisoles y Cambisoles del estado de Brandenburgo en Alemania, encontraron un coeficiente de correlación de Pearson de 0.957.

En la Tabla 2 se observan los valores de humedad de saturación, humedad residual y de los parámetros de ajuste de las curvas determinados a partir del modelo de Van Genuchten. En el caso de la humedad de saturación, los mayores valores se encontraron en el uso *Bosque de pinos*, el cual difiere de forma altamente significativa de los usos bajo gramíneas, donde *Pasto natural* también mostró diferencias altamente significativas con respecto a *Caña de azúcar*, que fue el tratamiento con menor humedad de saturación. La conducta de este último se asocia con los bajos tenores de materia orgánica (Martínez *et al.*, 2008). Los mayores contenidos de agua de saturación en *Bosque de pinos* indican que en este uso existe un mayor volumen de macroporos. Además, existe una mejor estructuración del suelo, pues el agua retenida a bajos potenciales matriciales depende, en gran medida, del comportamiento de la capilaridad y la distribución de la porosidad (Ruíz *et al.*, 2002).

En *Bosque de pinos* la recarga de agua producida por las precipitaciones es más eficiente, al poder almacenar una mayor cantidad de humedad en el suelo, lo que hace que la influencia del régimen hídrico údico sea más manifiesta. Un mayor volumen de humedad en *Bosque de pinos* puede acelerar, con respecto a los demás usos de la tierra, la hidratación de los óxidos de hierro. Este fenómeno pudiera disminuir los contenidos de hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) y aumentar los de goetita ($\alpha\text{-FeOOH}$), lo que provocaría cambios en la coloración de los suelos, de rojo (7.5R-5YR) a amarillo (7.5YR-2.5Y).

De la misma forma, el hecho de que en este uso exista una mayor humedad de saturación apunta a una menor compactación, debido a que esta agua se sitúa fundamentalmente en los espacios existentes entre los agregados del suelo.

En el caso de la humedad residual el comportamiento de los usos de la tierra fue *Bosque de pinos*>*Pasto natural*>*Caña de azúcar*. No se encontraron diferencias

significativas entre los tratamientos. Una mayor retención de humedad residual en *Bosque de pinos* indica un arcillamiento mucho más intenso en este uso.

Silva *et al.* (2012) al evaluar el comportamiento de θ_{RES} en un Oxisol brasileño en el estado de Pará, bajo un clima Aw, encontraron que esta era mayor en los sitios bajo bosque que en aquellos que estaban dedicados a la siembra de pasturas, con valores de 0.2277 y 0.1040 m³ m⁻³, respectivamente. Ruíz *et al.* (1992) al evaluar el comportamiento de la curva tensión-humedad en varios agrupamientos de suelos cubanos determinaron que la humedad residual era menor en los suelos arenosos que en aquellos donde el contenido de arcilla era convincentemente alto (Vertisoles).

Al evaluar el comportamiento del parámetro α se aprecia que este fue mayor en el uso de la tierra *Bosque de pinos* y que mostró diferencias significativas con los usos bajo gramíneas. En estos dos usos, los bajos valores de α indican, sobre todo en *Caña de azúcar*, un predominio de los microporos, que hace que en este uso el agua se pierda con más lentitud.

Tabla 2.- Humedad de saturación, humedad residual y parámetros del modelo de Van Genuchten en los tres usos de la tierra.

Usos de la tierra	Humedad de saturación (cm ³ cm ⁻³)	Humedad residual (cm ³ cm ⁻³)	Parámetros de la curva de retención de agua en el suelo		
			α (cm ⁻¹)	n (-)	m (-)
Caña de azúcar	0.503c	0.141n.s.	0.011b	1.425n.s.	0.256n.s.
Pasto natural	0.585b	0.259n.s.	0.019b	1.811n.s.	0.417n.s.
Bosque de pinos	0.678a	0.315n.s.	0.039a	1.856n.s.	0.456n.s.

El parámetro n , que determina las variaciones más o menos bruscas de la curva a medida que aumenta la tensión (Ruíz *et al.*, 1992), mostró los valores más bajos en el

uso de la tierra *Caña de azúcar*, lo que indica una distribución de poros según su tamaño más amplia en este uso. Sin embargo, Ruíz *et al.* (2006), al estudiar los métodos utilizados en Cuba para la determinación de las propiedades hidráulicas de los suelos no encontraron valores que les permitiera establecer una relación lógica según el agrupamiento de suelos.

La Figura 6 muestra el comportamiento de las curvas de retención de agua del suelo (CRAS) en cada uno de los usos de la tierra. Se puede apreciar que la curva de retención de agua del suelo entre los 10-90 kPa del uso Bosque de pinos se encuentra por encima de los otros dos usos, lo que indica una mayor retención de humedad en las áreas bajo bosque que en las destinadas a actividades agropecuarias.

Además, en *Caña de azúcar*, se observa que en el rango de tensiones de -90 a -1500 kPa la curva de retención de agua del suelo muestra un comportamiento casi rectilíneo, lo que corrobora los valores de α obtenidos, pues esta pauta de la CRAS indica una baja capacidad de almacenamiento de agua debido a la existencia de microporos en el suelo.

En la forma de la curva de retención de agua del suelo en *Caña de azúcar* juega un papel fundamental la compactación, que viabiliza la disminución del diámetro de los poros del suelo. Este fenómeno, unido a la pérdida de la estructura, ha reducido la velocidad de infiltración, que es menor en este uso que en las áreas bajo bosque, y aumentado la escorrentía; incrementándose así la susceptibilidad a ser afectado por los diversos tipos de erosión y a la pérdida de parte de la masa del suelo.

Lo pronunciado de la curva en *Bosque de pinos* indica un vaciado gradual de los poros del suelo, debido a una mayor heterogeneidad de la distribución del volumen de poros según su diámetro. Un comportamiento contrario se observa en el uso *Caña de azúcar*, donde lo aplanado de la CRAS indica más homogeneidad en la distribución de los poros según su tamaño, lo cual no resulta conveniente para los suelos de usos agrícolas.

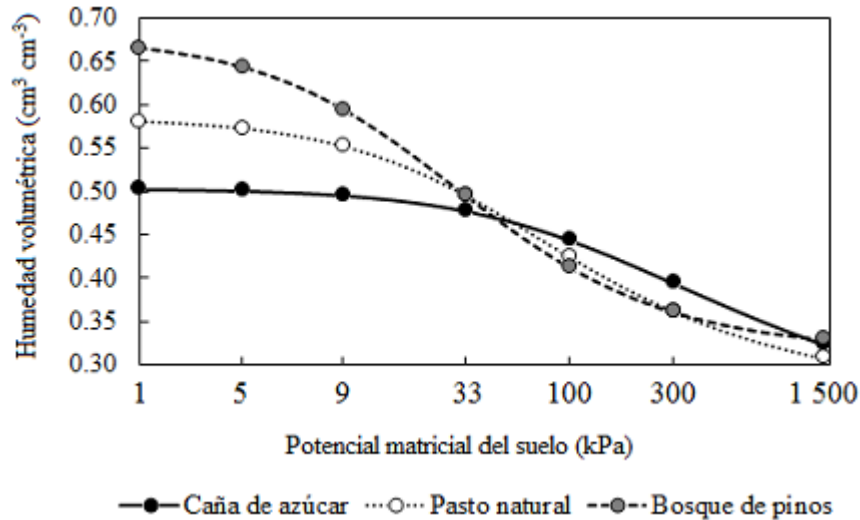


Figura 7.- Curvas de retención de agua en el suelo en los tres usos de la tierra.

En el rango de tensiones que va desde -33 hasta -1 500 kPa el contenido de humedad de la SWRC en *Caña de azúcar* es mayor que en *Bosque de pinos* y *Pasto natural*. Esto responde a que durante el proceso de compactación que ocurre en este uso de la tierra el volumen de poros que retienen el agua a esas tensiones es mayor, debido a la formación de poros más pequeños producto de la compactación, que se suman a los que ya existían anteriormente (Ruíz *et al.*, 1992).

Oliveira *et al.* (2004) Al estudiar las curvas de retención de humedad en el suelo en Oxisoles del cerrado (sabana) brasileño encontraron que la mayor retención de agua en el suelo, entre -100 y -1 500 kPa, ocurría donde mayor era la densidad del suelo, además de que la distribución del volumen de poros según su tamaño indicaba un predominio de la microporosidad en el suelo.

Las ecuaciones que resultan para cada uno de los usos de la tierra a partir del modelo de van Genuchten y de la media de los valores de la humedad de saturación la humedad residual y los parámetros del modelo se muestran en la Tabla 4. Para las curvas de retención de agua en el suelo, el modelo matemático ajustado a los datos explicó el 89.43% (*Caña de azúcar*) o más, de la variabilidad del contenido de humedad para los tres usos de la tierra.

Tabla 3.- Ecuaciones matemáticas a partir del modelo de van Genuchten en cada uso de la tierra.

Usos de la tierra	Ecuación matemática	Coefficiente de regresión
Caña de azúcar	$\theta(h) = 0.141 + \frac{0.503 - 0.141}{[1 + (0.0011h)^{1.425}]^{0.256}}$	0.8943
Pasto natural	$\theta(h) = 0.259 + \frac{0.585 - 0.259}{[1 + (0.019h)^{1.911}]^{0.417}}$	0.9893
Bosque de pinos	$\theta(h) = 0.315 + \frac{0.678 - 0.315}{[1 + (0.039h)^{1.856}]^{0.456}}$	0.9919

CONCLUSIONES

En *Bosque de pinos* la recarga de agua que procede de las precipitaciones es más eficiente debido a una mayor capacidad de almacenaje de humedad. La mayor humedad de saturación, así como una mejor relación de macroporos y microporos indica que en los suelos bajo el uso de la tierra *Bosque de pinos* están mejor estructurados, existe menos compactación, menor resistencia del suelo a la penetración, mejor aireación, mayor retención de humedad y una adecuada conductividad hidráulica. Estos cambios se relacionan, en dependencia del uso de la tierra, con los contenidos de inclusiones, tipo, cantidad y lugar de la deposición de restos vegetales. En el uso *Caña de azúcar* es menor la retención de humedad en las tensiones más bajas, debido a una mayor compactación y al deterioro de la estructura, que provoca la disminución de la macroporosidad y dificultades en la infiltración de agua.

RECOMENDACIONES

Las zonas con pendientes pronunciadas, carentes de vegetación o cercanas a los cursos de agua y orillas de embalses deben dedicarse a usos de la tierra boscosos con el fin de mejorar la estructura del suelo, aumentar la infiltración del agua, reducir la escorrentía, disminuir las pérdidas de la masa del suelo y evitar el azolvamiento de los espejos de agua.

BIBLIOGRAFÍA

- Buske, Taise Cristine; Dias Robaina, A.; Xavier Peiter, Marcia; Benetti Rosso, R.; Ricalde Torres, R. y 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.
- Cuéllar, I., Villegas, R., de León, M. y Pérez, H. 2002. Manual de fertilización de la caña de azúcar en Cuba. Ediciones Publinica. La Habana, 127 pp.
- Czyż, E. y Dexter, A., 2009. Soil physical properties as affected by traditional, reduced and no-tillage for winter wheat. *International Agrophysics*, 23: 319-326.
- Hernández, María F. y Muñoz, J. F. 2009. Influencia de las curvas de retención de humedad en la estimación de la evaporación de acuíferos someros. En: O. Silva *et al.* (Eds.). *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo*. Vol IX. Barcelona, 1-8.

- FAO. 2006. World Reference Base for soil resources. A framework to international classification, correlation and communication. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma, 128 pp.
- Fooladmand, H. R. y Habibi, M. 2012. Estimating soil water characteristic curve based on soil-particle-size distribution curve and local void ratio. *African Journal of Agricultural Research*, 7(14): 2197-2204.
- Giráldez, J. V., Vanderlinden, K., Jiménez Hornero, F. J. y Laguna, A. M. 2011. Análisis de la evolución de la humedad del suelo. En: *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo*. Volumen X. Salamanca, 13-18.
- Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar. 2007. Instructivo técnico para la producción y el cultivo de la caña de azúcar. Dirección de Producción de Caña, Instituto Nacional de investigaciones de la Caña de Azúcar. La Habana, 146 pp.
- Kalicka, M., Witkowska-Walczak, B., Sławiński, B. y Dębicki, R. 2008. Impact of land use on water properties of rendzinas. *International Agrophysics*, 22: 333-338.
- Korus, M., Sławiński, C. y Witkowska-Walczak, B. 2007. Attempt of water retention characteristics estimation as pedotransfer function for organic soils. *International Agrophysics*, 21: 249-257.
- Lipiec, J., Walczak, R., Witkowska-Walczak, B., Nosalewicz, A., Słowińska-Jurkiewicz, A. y Sławiński, C., 2007. The effect of aggregate size on water retention and pore structure of silt loam soils of different genesis. *Soil Tillage Research*, 97: 239-246.
- López Canteñs, G., Herrera Puebla, J., Ostos Santos, A., Lizarraga Mendiola, L. y Hernández Ávila, J. 2010. Aplicación de modelos matemáticos para la obtención de la curva de retención de humedad del suelo. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 6(1): 44-50.
- Martínez, E., Fuentes, J. P. y Acevedo, E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, 8 (1): 68-96.

- Oliveira, G. C., Dias Junior, M. S., Resck, D. V. S. y Curi, N. 2004. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28: 327-336.
- Reichert, J. M., Albuquerque, J. A., Kaiser, D. R., Reinert, D. J., Lavarda Urach, F. y Carlesso, R. 2009. Estimation of water retention and availability in soils of Rio Grande do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33: 1547-1560.
- Rucks, L., García, F., Kaplan, A., Ponce de León, J. y Hill, M. 2004. Propiedades físicas del suelo. Facultad de agronomía, Universidad de la República. Montevideo, 68 pp.
- Ruiz, M. E.; Medina, H. y Herrera, J. 2006. Métodos empleados en Cuba para determinar las propiedades hidráulicas de suelos. *TERRA Latinoamericana*, 24 (3): 311-318.
- Ruíz, M. E.; Utset Suástegui, A.; Lau Quan, A., Herrera Puebla, J., Llanos, María Antonia. 1992. Tres modelos para la curva tensión-humedad en algunos tipos de suelos. *Revista Cubana de Física*, 12(1): 45-50.
- _____, Utset Suástegui, A. y Medina, H. 2002. Algunas consideraciones sobre las curvas tensión-humedad. VI Escuela Latinoamericana de Física del Suelo (Conferencia en formato electrónico). La Habana, 41 pp.
- Sales, Maria Monaliza de; Araújo Neto, J. R. de; Araújo de Queiroz Palácio, Helba; Guerreiro Chaves, L. C. y 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.
- Shwetha P; Varija K. 2015. Soil water retention curve from saturated hydraulic conductivity for sandy loam and loamy sand textured soils. *Aquatic Procedia*, 4: 1142-1149.
- Silva Guedes, Elaine Maria, Rodrigues Fernandes, A., Veras de Lima, Herdjanía, Pereira Serra, A., Ribamar Costa, J. y da Silva Guedes, R. 2012. Impacts of different management systems on the physical quality of an amazonian Oxisol. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36: 1269-1277.

- Stakman, W. P. 1980. Measuring soil moisture. En: *Drainage principles and applications*. Volumen III. ILRI. Wageningen, 221-251.
- Terleev, V. V., Mirschel, W., Schindler, U. y Wenkel, K. O. 2010. Estimation of soil water retention curve using some agrophysical characteristics and Voronin's empirical dependence. *International Agrophysics*, 24: 381-387.
- 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. 91 pp.
- FAO. 1987. Agricultura: Toward 2000. FAO. Roma, 59 pp.
- Instituto Nacional de Investigaciones de la Caña de Azúcar. 1996. Los suelos dedicados al cultivo de la caña de azúcar. Instituto Nacional de investigaciones de la Caña de Azúcar. La Habana. 45 pp.
- Jaramillo, D. F. 2002. Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín, 613 pp.
- Jordan López, A. 2006. Manual de Edafología. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química Agrícola, Universidad de Sevilla. Sevilla, 143 pp.
- Mesa, A., Suárez, O., Hernández, Mayda, Tremols, J. y Clemente, B. 1982. Evaluación de los suelos de Cuba referida a 35 cultivos fundamentales. *Agrotecnia de Cuba*, 14(2): 23-32.
- Meyer, J., Rein, P., Turner, P. y Mathias, Kathryn. 2011. Good management practices manual for cane sugar industry. International Finance Corporation. Johannesburgo, 696 pp.
- _____, Hernández, A., Vantour, A., Soto, F. y Baisre, J. 2001. Factores limitantes agroproductivos en el macizo montañoso Nipe-Sagua-Baracoa. *XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo* (CD-ROM). Varadero, Cuba.
- Ponce de León, D. y Balmaseda C. 1999. El recurso suelo en el cultivo de la caña de azúcar. Instituto Nacional de Investigaciones de la caña de azúcar. La Habana, 115 pp.

Ruz, E., García-Huidobro, J. y Akayaga, S. 1977. Caracterización hídrica y relaciones entre las propiedades físicas en suelos regados de la provincia de Santiago. II. Correlación de métodos para determinar constantes físicas. *Agricultura Técnica*, 37: 49-54.

_____. Y Travieso, A. 1968. Climarregiones de Cuba. *Revista de la Agricultura*, 2(1): 5- 23.

Torres Álvarez, L. M. 2000. Caracterización edafoclimática de las áreas agrícolas de la zona sur de la Empresa de Cultivos Varios de Nueva Paz. II. Estudio edafológico. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuaria*, 9(2): 93-96.

_____. Y Nielsen, D. R. 1985. On describing and predicting the hydraulic properties of unsaturated soils. *Annales Geophysicae*, 3(5): 615-628.

Vantour, A., Hernández, A., Morales, M. y Garea, E. 2006. La diversidad pedológica de los sistemas montañosos Nipe-Sagua-Baracoa y la Sierra Maestra. *VI Congreso Cubano de la Ciencia del Suelo* (CD-ROM). La Habana, Cuba.

_____., Hernández, A., Morales, M., Ruíz, J., Baisre, J., Martín, G. Vega, H. y Garea, E. 2001. Las regiones edáficas para el cafeto del macizo montañoso Nipe-Sagua-Baracoa. *XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo* (CD-ROM). Varadero, Cuba.

Samek, V. 1969. La vegetación de la Isla de Pinos. Academia de Ciencias de Cuba. *Ser. Isla de Pinos*, 28: 1-28.

Green, R. T., Ahuja, L. R. y Benjamin, J. G. 2003. Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. *Geoderma*, 116: 3-27.

ANEXOS

Anexo 1

Correlación aproximada de los Ferríticos Rojos Oscuros típicos con algunas clasificaciones nacionales e internacionales.

Clasificación	Nombre
Clasificación de los Suelos de Cuba (Hernández <i>et al.</i> , 2015)	Ferrítico Rojo Oscuro húmico desaturado
Nueva Versión de Clasificación Genética de los Suelos de Cuba (Hernández <i>et al.</i> , 1999)	Ferrítico Rojo Oscuro típico
Primera Clasificación Genética de los Suelos de Cuba (Instituto de Suelos, 1973)	Latosol Rojo típico
Segunda Clasificación Genética de los Suelos de Cuba (Hernández <i>et al.</i> , 1975)	Ferrítico Púrpura concrecionario
Clasificación de Bennett y Allison	Nipe

(Bennett y Allison, 1966)	
Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2010)	Typic Eutrudox
Leyenda Revisada (FAO-UNESCO, 1989)	Rhodic Ferralsol

Anexo 2.- Algunas características edáficas de las áreas bajo los diferentes usos.

	Caña de azúcar	Pasto natural	Bosque de pinos
Tipo	Ferrítico Rojo Oscuro	Ferrítico Rojo Oscuro	Ferrítico Rojo Oscuro
Subtipo	Típico	Típico	Típico
Género	Sobre rocas ultrabásicas (material basal); medianamente desaturado (saturación)	Sobre rocas ultrabásicas (material basal); medianamente desaturado (saturación)	Sobre rocas ultrabásicas (material basal); fuertemente desaturado (saturación)
Especie	Profundo, poco humificado, poco erosionado, muy concrecionario	Profundo, poco humificado, poco erosionado, muy concrecionario	Poco profundo, medianamente humificado, medianamente erosionado, muy concrecionario

Variedad	Arcilla caolinítica (> 75%)	Arcilla caolinítica (> 75%)	Arcilla caolinítica (> 75%)
Profundidad efectiva	Medianamente profundo (0.60 m)	Medianamente profundo (0.60 m)	Muy poco profundo (0.16 m)
Pendiente predominante	Ondulado	Ondulado	Fuertemente alomado
Altitud	Montañoso	Montañoso	Montañoso

Anexo 3

Análisis mecánico de la Arcilla Nipe ⁽¹⁾, realizado por Bennett y Allison (1966) en 1928, adaptado a la Clasificación del USDA adoptada en 1938.

Prof. (cm)	Arena				
	muy gruesa 2-1 mm (%)	gruesa 1-0.5 mm (%)	mediana 0.5-0.25 mm (%)	 fina 0.25-0.1 mm (%)	muy fina 0.1-0.05 mm (%)
0-66	11.5	7.9	2.6	6.5	11.0
66-102	5.8	6.1	2.6	6.9	10.2
102-396	0.2	1.9	1.6	6.2	8.4

¹ Se usó HCl y NaOH para la dispersión de las muestras.

Anexo 4

Contenido de inclusiones (>2 mm) en el horizonte A de los suelos Ferríticos Rojos Oscuros típicos de Pinares de Mayarí.

	Porcentaje de inclusiones >2 mm (%)
Caña de azúcar	17.16
Pasto natural	32.79
Bosque de pinos	17.47