

**FACULTAD DE
CIENCIAS NATURALES Y AGROPECUARIAS**

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

**Título: Determinación de indicadores de calidad de un
Vertisol bajo diferentes usos de la tierra.**

Autora: Leyanis María Pupo Rodríguez

Tutor: Ing. Roberto Alejandro García Reyes

Ms C. Juan Alejandro Villazón Gómez

Holguín 2022

RESUMEN

El uso del suelo tiene gran repercusión en la formación de procesos de degradación, por lo que se hace necesario determinar las propiedades físicas y químicas que pudieran ser utilizadas para evaluar su calidad mediante indicadores. El trabajo se desarrolló con el objetivo de determinar indicadores físicos y químicos de calidad de un Vertisol bajo diferentes usos de la tierra: pasto natural, bosque secundario y caña de azúcar, en un área perteneciente al bloque experimental de la Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar en el municipio Mayarí de la provincia Holguín. El muestreo se realizó en los tres usos de la tierra y se determinaron las propiedades físicas y químicas a una profundidad de hasta 0,30 metros, de forma irregular en el terreno. La estadística descriptiva arrojó que existe una alta variabilidad en los valores que toman las propiedades determinadas en los diferentes usos, y que en dependencia del uso de la tierra estas adquieren valores que van desde el óptimo para el establecimiento del cultivo hasta el alarmante en cuestión del desencadenamiento de procesos de degradación de los suelos. El análisis multivariado mostró que en el caso del pH, humedad gravimétrica, densidad aparente, porosidad total y resistencia a la penetración pueden ser utilizadas como indicadores de calidad en los usos de la tierra estudiados, o presentar los valores más altos de correlación cofenética y mejor clasificados en el análisis discriminante.

ABSTRACT

Soil use has a great impact on the formation of degradation processes, so it is necessary to determine the physical and chemical properties that could be used to evaluate its quality through indicators. The work was developed with the objective of determining physical and chemical quality indicators of a Vertisol under different land uses: natural pasture, secondary forest and sugar cane, in an area belonging to the experimental block of the Provincial Research Station of the Sugar cane in the Mayarí municipality of the Holguín province. The sampling was carried out in the three uses of the land and the physical and chemical properties were determined at a depth of up to 0.30 meters, irregularly in the ground. The descriptive statistics showed that there is a high variability in the values that the determined properties take in the different uses, and that depending on the use of the land, these acquire values that go from the optimum for the establishment of the crop to the alarming in question of the triggering of soil degradation processes. The multivariate analysis showed that in the case of pH, gravimetric humidity, bulk density, total porosity and resistance to penetration can be used as quality indicators in the land uses studied, or present the highest values of cophenetic correlation and better classified in the discriminant analysis.

Índice

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 4 |
| 1. El suelo y su composición..... | 4 |
| 1.1. Evaluación de los suelos..... | 5 |
| 2. Vertisoles..... | 6 |
| 2.1. Los suelos Vertisoles en Cuba..... | 7 |
| 2.2. Factores limitantes de los suelos Vertisoles..... | 7 |
| 2.3. Manejo de los Vertisoles..... | 10 |
| 3. Indicadores de calidad de los suelos..... | 10 |
| 3.1. Materia orgánica y sus fracciones..... | 11 |
| 3.2. Reacción del suelo..... | 12 |
| 3.3. Densidad aparente..... | 13 |
| 3.4. Resistencia a la penetración..... | 13 |
| 3.5. Porosidad del suelo..... | 14 |
| 3.6. Humedad del suelo..... | 15 |
| 4. Metodologías de construcción de índices de calidad de suelos..... | 17 |
| 5. La agricultura y su relación con la calidad del suelo..... | 19 |
| 5.1. Los cambios en el uso de la tierra..... | 21 |
| MATERIALES Y MÉTODOS..... | 23 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 26 |
| CONCLUSIONES..... | 35 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 36 |

INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso no renovable con una importancia ecológica notable y varias funciones únicas que incluyen el ciclo de nutrientes, agua almacenamiento, producción de biomasa y alojamiento de la reserva de biodiversidad (Ciancio y Gamboni, 2017).

Estas funciones pueden ser determinado por indicadores de calidad del suelo tales como físicos, químicos, y propiedades biológicas (Bunemann *et al.*, 2018). La estabilidad de los agregados del suelo, materia orgánica, pH, fósforo disponible, almacenamiento de agua y algunas otras propiedades se han utilizado como indicadores directos en la evaluación de la calidad del suelo en agroecosistemas (Haydu-Houdeshell *et al.*, 2018).

Los efectos del uso y cobertura de la tierra y las prácticas de manejo en el suelo y tienen efecto sobre su calidad, lo cual ha sido estudiado en muchos escenarios productivos (Tellen y Yerima, 2018), arribando que las propiedades del suelo se ven muy afectadas por su biomasa aérea y se ha aprobado que a mayor altura sobre el suelo la biomasa conduce a una mejor calidad del suelo en suelos (Guzmán *et al.*, 2019).

El manejo del suelo es muy crítico y sensible en zonas áridas y frágiles, dado por la gestión inadecuada que pueden dar lugar a cambios irreversibles en las propiedades del suelo (O'Sullivan *et al.*, 2015).

La comprensión de la funcionalidad del uso de la tierra bajo diversas prácticas pueden ayudar a los productores a evitar cambios peligrosos. Aunque los indicadores de calidad se evalúan entre diferentes usos y coberturas del suelo, las condiciones de calidad del suelo pueden diferir bajo un uso y cobertura de suelo específico debido a la heterogeneidad espacial (Safei *et al.*, 2019).

Se han identificado varios requisitos para los indicadores de calidad del suelo. En algunos enfoques (pero no en todos) para evaluar la calidad del suelo. Todas las publicaciones que enumeran dichos requisitos mencionan al menos una condición conceptual, como que un indicador elegido debe estar relacionado con una determinada amenaza, función o servicio del ecosistema del suelo y ser relevante.

Sin embargo, esto no es de gran utilidad si la evaluación de la calidad del suelo no es dirigida a una amenaza, función o servicio ecosistémica específico del suelo (Morvan *et al.*, 2008).

En cuanto a la interpretación de los valores obtenidos, a menudo se desea la comparabilidad con los datos de otras campañas de muestreo. Sin embargo, algunos indicadores como el carbono orgánico (o el contenido orgánico del suelo) materia) el contenido y el pH a menudo se miden, mientras que otros como rara vez se evalúa la densidad aparente o la diversidad de lombrices (Morvan *et al.*, 2008).

Un indicador solo es útil si su valor se puede interpretar de manera inequívoca y se dispone de valores de referencia. Valores de referencia para un determinado indicador podrían ser los de un suelo nativo, que sin embargo puede no ser apto para la producción agrícola, o de un suelo con máxima producción y/o desempeño ambiental (Doran y Parkin, 1996).

Alfonso y Carrobello (2002) argumentan que los suelos agrícolas cubanos el 76,8 % están afectados por procesos de degradación, donde intervienen factores de diversa índole que limitan el rendimiento de los cultivos a valores inferiores a un 70 %. De ahí que el 46 %, se consideren muy pocos productivos, mientras que el 30,8 % del total están clasificados en la categoría de pocos productivos.

Según el Instituto de Suelos (2001) las áreas agrícolas en Cuba se encuentran afectan por factores como: baja fertilidad, el mal drenaje, la salinidad, la erosión, muy bajo contenido de MO, baja retención de humedad, compactación y la acidez. Cairo y Fundora (1995) argumentan que el laboreo continuo e intensivo y el uso de monocultivos en áreas agrícolas traen como consecuencia la degradación acelerada de los suelos.

En Cuba hay pocos estudios que enfocan el estudio de la mesofauna y su relación con el uso y manejo agrícola, la mayor parte de estos se han desarrollado sobre suelos ferralíticos (Cabrera *et al.*, 2011; Socarrás y Robaina, 2011).

Por lo antes expuesto se plantea como ***problema científico:***

¿Cómo determinar indicadores físicos y químicos de calidad de un Vertisol bajo diferentes usos de la tierra?

Como **hipótesis:**

La determinación de propiedades físicas y químicas permite establecer indicadores de calidad en un Vertisol bajo diferentes usos de la tierra.

Objetivo general:

Determinar indicadores físicos y químicos de calidad de un Vertisol bajo diferentes usos de la tierra.

Objetivos específicos:

- Caracterizar las propiedades físicas y químicas del Vertisol bajo diferentes usos de la tierra.
- Determinar mediante Análisis Multivariado los posibles grupos de propiedades físicas y químicas del Vertisol bajo diferentes usos que pueden ser utilizados como indicadores de calidad.
- Recomendar las propiedades físicas y químicas del Vertisol bajo diferentes usos que pueden ser utilizados como indicadores de calidad.

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1. El suelo y su composición

El suelo es un recurso natural, vivo, dinámico de difícil de renovar, compuesto de partículas de minerales de diferentes tamaños, materia orgánica (MO) y numerosas especies de microorganismos. Respecto a su constitución general puede decirse que su proporción ideal oscila entre 45-48% de partículas minerales, 5-2% de materia orgánica, 25% de agua y 25% de aire (Sánchez, 2007).

Sin embargo, en la práctica estas proporciones ideales pueden sufrir variaciones como reflejo de la evolución, grado de interperismo y desarrollo que ha tenido un suelo. Por ejemplo, un típico suelo de pradera (Molisol) puede contener 5 a 6% de MO en los 15 cm superiores, mientras que un suelo arenoso posee aproximadamente 1 %. Por su parte, un suelo pobremente drenado a menudo tiene contenidos de MO próximos al 10 % o más, mientras que los suelos tropicales Oxisoles son conocidos por sus bajos contenidos de MO (Silva, 1998).

Según Muñiz (2001) el suelo es consecuencia de la naturaleza, constituye el hábitat de las plantas, donde a la vez favorecen su desarrollo, además es el medio de mayor importancia, en el desarrollo de los cultivos. Es el elemento indispensable donde se realizaran aplicaciones de diferentes tipos de fertilizantes, ya que estos son el sostén y el sustento de los cultivos agrícolas, las propiedades de los suelos se determinan, por el sistema de cultivos en última instancia, donde se pueden desarrollar de manera sostenible, los cuales demandan de los nutrientes que requieren las plantas para proporcionar los rendimientos adecuados.

Debe considerarse no sólo como una mezcla o agregación de sustancias minerales u orgánicas sino como un sistema vivo. Un suelo viviente incluye su vida microbiana como las condiciones bajo las cuales esta vida microbiana puede establecerse, incrementarse o mantenerse por los que se debe fomentar el uso

práctico de la materia orgánica (MO) que es un factor básico de la vida del suelo y la sostenibilidad (Vázquez, 2003).

1.1. Evaluación de los suelos

La evaluación de los suelos es una herramienta fundamental para planificar el uso de los recursos naturales, ya que el objetivo es utilizar cada suelo para aquello que presenta mejores características y programar su manejo de manera que se cause la mínima degradación.

Existen diversos métodos de evaluación de suelos, que pueden ser clasificados según su enfoque en: métodos cualitativos, métodos paramétricos y métodos cuantitativos. En el primer grupo, encontramos los más usados a nivel mundial, como la Clasificación de las tierras por su Capacidad de Uso (Klingebiel y Montgomery, 1962), el Esquema de Evaluación de Tierras de la FAO y la Ponderación Potencial de Suelos, entre otras.

Los métodos paramétricos, como el Índice de productividad de Riquier (1970), integran en una fórmula multiplicativa, propiedades intrínsecas del suelo dando como resultado un único valor, cuyo objetivo es comparar la capacidad productiva de distintos suelos.

Los métodos cuantitativos permiten establecer relaciones entre la productividad y los factores edáficos, climáticos y de manejo. Su basamento consta de extensas series de datos puntuales, que permiten el desarrollo de modelos matemáticos predictores. A mayor magnitud de datos de base, mayor poder de predicción tiene el modelo. Otra forma de evaluar los suelos, es midiendo su calidad y para ello suelen utilizarse ciertas propiedades físicas, químicas y biológicas, que funcionan como indicadores (Debelis, 2011).

La calidad del suelo ha sido definida por el Comité para la Salud del suelo de la *Soil Science Society of America* como “la capacidad de cada tipo de suelo para funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o intervenido, a fin de sostener la productividad vegetal y animal, mantener o mejorar la calidad del agua y el aire, preservando la salud humana (Karlen *et al.*, 1997).

2. Vertisoles

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 (Michéli, 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 cambiabiles, 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 oscura. 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).

2.1. Los suelos Vertisoles en Cuba

Los Vertisoles ocupan una extensión en nuestro país de 695 000 ha, presentándose en casi todas las provincias de Cuba, la de mayor extensión la provincia de Granma donde ocupan un área de 228 000 ha; y las de menor extensión Pinar del Río (700 ha), Matanzas (12 500 ha) y la antigua provincia Habana (14 100 ha) (Hernández *et al.*, 2014).

2.2. Factores limitantes de los suelos Vertisoles

La degradación de suelos es un conjunto de procesos físicos, químicos y biológicos que afectan la productividad de los ecosistemas. Los cambios producidos en el suelo por este proceso pueden llegar a ser irreversibles y tener consecuencias sociales, económicas, ecológicas y políticas negativas. El proceso de degradación se relaciona íntimamente con el uso inadecuado de los recursos agua, suelo, flora y fauna por el hombre (Alejo *et al.*, 2012) y sobreexplotación de nutrientes (FAO, 1995).

Uno de los factores limitantes en estos suelos es la salinización, provocada por la acción antropogénica, la cual puede afectar seriamente terrenos de cultivos de buena productividad por efecto acumulativo de las sales durante la explotación agrícola de áreas susceptibles a la salinización, por la extracción excesiva de agua de los pozos en época de sequía y la práctica de aplicación de altas dosis de fertilizantes químicos en suelos de mal drenaje y con manto freático alto (Alvarez, 2002).

A nivel mundial, se indica que existen más de 800 millones de hectáreas de suelos afectados por altas concentración de diferentes tipos de sales, por lo que se cataloga como uno de los problemas más importantes de la agricultura, debido a

que la salinidad tiene efectos perjudiciales sobre la germinación de las semillas y atrofiar el crecimiento de las plantas, causándole la muerte (Narváez *et al.*, 2014).

Nuestro país, por su condición de insularidad, presenta áreas con salinidad primaria, sin embargo, la mayoría de los suelos afectados se debe a la actividad antrópica, iniciada en el siglo XVI, básicamente por la deforestación despiadada de tierras altas y ciénagas costeras. Esta situación fue agravada durante el siglo XX por el uso, para el riego, de aguas salinizadas de acuíferos con intrusión marina, así como otras aguas de baja calidad y esencialmente por la elevación del manto freático salinizado como consecuencia de la intensificación del riego y construcción de embalses, sin haber considerado la construcción de sistemas de drenaje que controlaran y evacuaran al manto freático, las sales disueltas (Otero *et al.*, 2011).

En la actualidad, más del 40% de los suelos cubanos presentan afectaciones por erosión lo cual es alarmante si se considera que el primer signo de la reacción en cadena desatada por la erosión es la disminución del rendimiento agrícola. Según estudios del Instituto de Suelos los cultivos más afectados por esta problemática son: la caña de azúcar (*Saccharum officinarum L*), los pastos y el arroz (*Oriza sativa L*), aunque la salinización se extiende a otros cultivos (Martí *et al.*, 2012).

En relación con el suelo, el fenómeno no solamente se presenta en un solo tipo genético definido pues además de los Solanchak, existe salinidad potencial o real, también en los suelos Gley, Vérticos y Aluviales, e incluso en los suelos Pardos y Ferralíticos compactados (Martí *et al.*, 2012).

En la provincia de Holguín el factor antrópico es el principal desencadenante de los procesos de degradación, debido fundamentalmente al mal manejo de los suelos, y pueden influir también los factores climáticos y genéticos (Corella *et al.*, 2002).

El estudio ejecutado por De Miguel y Sánchez (2011) en los suelos del Valle del Cauto arrojó como resultado, que las condiciones hidrogeológicas existentes representan una de las principales fuentes de salinización actual de los suelos presentes en este territorio y que se desarrolla anualmente en cientos de

hectáreas en menor o mayor grado. Se produce por la conjugación de factores naturales presentes y la actividad antrópica que en este territorio se desarrolla, sobre todo en la explotación agrícola de los suelos, donde se aplica riego sin la debida argumentación del mismo y con falta de drenaje que corresponda a las características hidrogeológicas del territorio, además que en la agricultura desde hace varios años se aplica la mecanización con equipos de alto tonelaje lo que por las condiciones existentes pueden provocar la compactación de los suelos, la reducción de porosidad del suelo y estratos subyacentes, se incrementa en estos sedimentos las propiedades de ascenso capilar y al tener una fuente de salinización a poca profundidad la salinización de los suelos se desarrolla a un ritmo más rápido.

En las regiones tropicales la erosión hídrica constituye el proceso de degradación de suelos más importante. Su magnitud depende, en primer lugar, de la energía cinética de las precipitaciones y del agua de escorrentía. Igualmente, también incide el relieve, pues el grado y la longitud de la pendiente aceleran la velocidad del escurrimiento superficial. Sobre esta forma de erosión influye, además, la susceptibilidad del suelo al desprendimiento y arrastre de partículas y el uso y manejo del medio edáfico (Cándido *et al.*, 2014).

Hasta finales de los 90, la labranza limpia y la intensificación de las actividades agrícolas predominaron en la agricultura cubana, debido entre otras causas a la modernización que se introdujo en las últimas décadas. La utilización de implementos y maquinarias potentes para la preparación de las tierras, agravadas por el uso de sistemas de riego de alta productividad, unida al progresivo abandono de la utilización de diferentes fuentes orgánicas y al incremento del uso de agroquímicos, conllevaron a un deterioro físico y químico gradual de la estructura, manifestada en la disminución de la materia orgánica, desaparición de la actividad faunística, incremento del pH, disminución de la flora edáfica y como consecuencia, la aparición de capas compactas al nivel de los 13-17cm (Martí *et al.*, 2012).

2.3. Manejo de los Vertisoles

Un adecuado manejo posibilita la preservación de las buenas condiciones físicas del suelo, lo cual incide en la eficacia de la reducción de la erosión y la escorrentía. Cuando se elimina la cobertura vegetal natural, si en la conducción del agroecosistema desarrollado no se tienen en cuenta las características de los suelos, el tipo de relieve y las condiciones climáticas de una región determinada, entonces se manifiestan en menor o mayor grado los procesos erosivos (Villazón *et al.*, 2017).

Los Vertisoles pueden ser muy productivos pero con restricciones para el manejo cuando están húmedos, con bajas tasas de infiltración y conductividad hidráulica, resultan ser susceptibles a la erosión y al escurrimiento. Presentan pobre aeración, se vuelven muy adhesivos y el exceso de agua en el suelo dificulta las operaciones de labranza, siembra y cosecha, como así también el tráfico de implementos agrícolas (Wilson y Cerana, 2004)..

Sin embargo, cuando están secos se vuelven muy densos y duros, con altas tasas de infiltración debido a la presencia de grietas que pueden ser muy importantes en ancho y profundidad. Estos tipos de suelo presentan alta estabilidad estructural en condiciones naturales debido al aporte proporcionado por los coloides, pero estos son afectados severamente por el manejo agrícola que provoca pérdida de materia orgánica y erosión (Wilson y Cerana, 2004).

3. Indicadores de calidad de los suelos

Diversos trabajos científicos nacionales e internacionales, están dedicados a la obtención de Indicadores de Calidad de Suelo, que cumplan con los requisitos de ser confiables, sensibles y sencillos de medir, además de reflejar los cambios de la calidad del mismo (Duval *et al.*, 2013)..

En nuestro país se han reportado, diversos indicadores químicos de la calidad edáfica: Materia Orgánica (MO) y sus fracciones (Andriulo e Irizar, 2017), contenido de P (Heredia, 2008), pH (Urricariet y Lavado, 1999), contenido de carbohidratos en el suelo (Bongiovanni y Lobartini, 2006).

Entre los indicadores físicos de calidad de suelo evaluados en Cuba y en el mundo, se pueden citar: estabilidad estructural (Gabioud *et al.*, 2011), densidad aparente (Druille *et al.*, 2013).

En cuanto al aspecto microbiológico, también se han desarrollado algunas técnicas que caracterizan la calidad de los suelos y por ello fueron reportados como indicadores. Tal es el caso de respiración microbiana (Ullé *et al.*, 2012) y actividad deshidrogenasa (Ferrerías *et al.*, 2009), Carbono de la Biomasa microbiana (Benitende *et al.*, 2017), Fauna edáfica (Vicentín *et al.*, 2008), Fosfatasa ácida y Actividad Ureásica (Ferrerías *et al.*, 2014).

3.1. Materia orgánica y sus fracciones

La Materia Orgánica es el parámetro más reportado en el mundo entero como indicador de la calidad del suelo y la sustentabilidad agronómica, por su influencia sobre variables físicas, químicas y biológicas (Reeves, 1997). Se trata de una mezcla heterogénea de compuestos orgánicos con propiedades diferentes y en distintos grados de transformación (Galantini y Suñer, 2008).

La mayoría de los métodos estiman la MO a partir de la cuantificación del Carbono Orgánico (CO), utilizando factores de conversión adecuados para cada suelo (Galantini *et al.*, 1994).

Es por ello que, dependiendo del autor, los resultados suelen expresarse en uno u otro término indistintamente. Incrementos en los niveles de MO se relacionan directamente con una mejor nutrición mineral, facilidad para las labores, reducción de la densidad aparente y mejoras en la capacidad de retención hídrica y la porosidad del suelo (Lal, 2002), hecho que justifica la gran importancia asignada a este indicador.

Cuando una tierra virgen es incorporada a cultivo, experimenta una rápida pérdida de MO como consecuencia de la mayor aireación provocada por la remoción del suelo y a la mayor extracción de la materia seca producida a través de cosechas y pastoreos. Esta pérdida es exponencial inmediatamente posterior al disturbio y finalmente se aproxima a un equilibrio en 50-60 años (Quiroga, 2004).

La MO asociada a la fracción mineral (MOM) representa la fracción más resistente del suelo, sin embargo, el efecto acumulado de las rotaciones y las labranzas puede producir cambios significativos, especialmente de largo plazo, tanto en la cantidad como en la calidad de esta fracción (Galantini *et al.*, 2002).

En un plazo menor de tiempo, el COP detectó cambios entre una rotación que incluyó dos años de leguminosas y la que incluía pasturas perennes. A partir de esto podría concluirse que el COP es útil como indicador de cambios en el corto plazo. Las fracciones lábiles son más sensibles a los efectos del uso de la tierra, indicadores tempranos del efecto de la rotación de cultivos, fertilización o sistemas de labranzas (Six *et al.*, 2002).

3.2. Reacción del suelo

La reacción del suelo hace referencia al grado de acidez o basicidad del mismo y se mide por el pH, que expresa la actividad de los iones H^+ , en escala logarítmica. El pH influye en propiedades físicas y químicas del suelo. A pH muy ácidos, existe una intensa alteración de los minerales y la estructura se vuelve inestable. A pH alcalinos, ocurre dispersión de arcillas, con la consecuente destrucción de la estructura y el deterioro de las condiciones físicas (Porta Casanelas *et al.*, 1999).

Desde el punto de vista químico, el pH influye marcadamente en la disponibilidad de nutrientes (Picone, 2005), por lo que resulta determinante en la nutrición vegetal. Existen estudios que evidencian disminuciones en el pH debidas al uso agrícola, principalmente asociadas al uso de fertilizantes nitrogenados (Liebig *et al.*, 2002).

Fabrizzi *et al.* (1998), trabajando sobre *Vertisoles* del sudeste de la provincia de Buenos Aires, reportaron pérdidas de 0,3 unidades de pH por la aplicación de 120 kg N ha⁻¹.

Cantú *et al.* (2007) encontraron pH menores en suelos bajo uso agropecuarios respecto a suelos de referencia, aunque en un rango que no resultó limitante para el crecimiento de los cultivos. El sistema de labranza también puede influenciar el pH del suelo. Al respecto, Buschiazzo *et al.* (1998) informaron disminuciones producidas por la incorporación de SD.

3.3. Densidad aparente

Entre los indicadores físicos que han aportado información sobre la calidad de los suelos, puede mencionarse la densidad aparente (D_a), que especifica la relación existente entre el espacio poroso y los componentes sólidos del suelo, se define como la masa por unidad de volumen y se expresa como $Mg\ m^{-3}$ (Venanzi *et al.*, 2004).

- I. Densidad real: Es el promedio ponderado de las densidades de las partículas sólidas del suelo (Rucks *et al.*, 2004).
- II. La densidad aparente es las características de los suelos que más influye sobre la productividad en estrecha relación con otras propiedades según Ingaramo *et al.* (2003) y está asociada a la disponibilidad y la tasa de difusión de los nutrimentos en el suelo (Zalamanca y Sadeghian, 2005)

Se han observado aumentos en la D_a debidas al pastoreo (Imaz, 2021). Otra de las causas del aumento de la D_a es el tránsito de máquinas agrícolas, que afecta a distintas capas de suelo dependiendo del sistema de labranza utilizado (Iglesias *et al.*, 2014).

En la región chaqueña, Osinaga *et al.* (2014) encontraron aumentos progresivos en la D_a debidos al uso agrícola prolongado. Campitelli *et al.* (2010), en suelos del centro de Córdoba, midieron mayores valores de D_a en suelos bajo cultivo que bajo monte nativo, con valores intermedios en suelos con desmonte reciente. Este aumento fue independiente de los sistemas de labranza evaluados, tanto para lotes con rotación trigo-soja como bajo monocultivo de soja.

3.4. 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).

La densidad aparente y la resistencia mecánica se relacionan entre ambas, lo que ha originado resultados contrastantes, cada una presenta una diferente sensibilidad para medir la compactación del suelo y no hay buena correlación entre ellas. En este sentido, la resistencia mecánica sería un método más sensible para medir la compactación del suelo, sobre todo en profundidad (Blanco, 2009).

3.5. Porosidad del suelo

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 μm , los meso son aquellos con diámetro equivalente entre 60 y 0.2 μm y como microporos a aquellos con diámetro inferior a 0.2 μm . Los macroporos (>60 μm) 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 (Greenland, 1979).

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).

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 *et al.*, 1994).

De ese volumen dependen tanto los fenómenos de transferencia de calor, gases, agua y solutos, como las propiedades mecánicas de resistencia a la penetración y resistencia a la rotura (Cerisola *et al.*, 2005).

3.6. Humedad del 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. 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 Martinez (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.

4. Metodologías de construcción de índices de calidad de suelos

Las primeras aproximaciones realizadas en el estudio de la calidad de los suelos centraron su esfuerzo en la selección de un conjunto mínimo de datos universal que fuese útil para evaluar su calidad en suelos de todo el mundo (Larson y Pierce, 1994).

Sin embargo, quedó demostrado que los indicadores apropiados para evaluar las funciones del suelo no son universales, sino que difieren según el objetivo de manejo en relación al tipo de suelo, clima y ecosistema que sea evaluado (Andrews *et al.*, 2002).

Una evaluación consistente de la calidad del suelo requiere una metodología sistemática para seleccionar, interpretar e integrar las propiedades del suelo que sean útiles como indicadores de calidad. Sin embargo, aunque existen muchos métodos para monitorear y evaluar la calidad del aire y del agua, ningún método único ha sido aceptado para la evaluación de la calidad del suelo debido, en gran parte, a la complejidad y variabilidad que presenta el sistema edáfico. Esto repercute en la gran cantidad de muestras que deben obtenerse y sumado a ello, en el gran número de determinaciones que deben realizarse para abarcar las diferentes funciones o propiedades del suelo, las que a su vez suelen estar interrelacionadas (Lu *et al.*, 2008).

De esta manera, el poder evaluar la calidad del suelo extrayendo la información más representativa de cada sistema y su integración en un valor fial que caracterice adecuadamente su calidad, representa sin duda alguna un gran desafío.

Según el trabajo realizado por Batidia *et al.* (2008), de las 14000 publicaciones que aparecen desde 1940 en referencia al término “calidad del suelo”, sólo 934 se refieren a indicadores, y de ellas, son muy pocas los que realmente proveen un índice que permita cuantificar la calidad de los suelos. Un indicador de calidad de suelo puede ser definido como el mínimo conjunto de parámetros, que interrelacionados, provee datos numéricos acerca de la capacidad de un suelo para llevar a cabo sus funciones (Acton y Padburry, 1993).

Se realizaron aproximaciones sistemáticas para desarrollar un índice integrado de calidad de suelos. Pierce y Larson (1993) propusieron utilizar procedimientos estadísticos de control de calidad para evaluar la dinámica de los cambios temporales en la calidad del suelo.

Doran y Parkin (1994) utilizaron una simple función multiplicativa para evaluar la calidad de los suelos considerando aspectos geográficos, climáticos y socioeconómicos. Esto es dificultoso ya que los mismos varían según el sistema productivo y tipo de suelo, entre otros factores. A pesar de las dificultades que presenta este sistema de evaluación de calidad de suelos, varios autores, implementaron esta metodología (Masto *et al.*, 2007). Gregorich *et al.* (1994) enfatizaron la importancia de incluir a las fracciones de la materia orgánica dentro del conjunto mínimo de indicadores a utilizarse en la evaluación de la calidad de los suelos.

En base a esta aproximación, Blair *et al.* (1995) propusieron la utilización de un indicador basado en la composición de las diferentes fracciones de carbono en el suelo (índice de manejo del carbono) para evaluar la calidad de los suelos. Concluyeron que dicho índice debe ser considerado como un indicador y no como un índice, debido a que no considera otros aspectos asociados a las funciones del suelo.

Wander y Bollero (1999) utilizaron el análisis multivariado para analizar diferentes parámetros de suelo. Las variables fueron agrupadas en físicas, químicas y biológicas. Aquéllas que mostraron diferencias significativas entre tratamientos fueron incluidas por grupos en el análisis multivariado.

Esta aproximación les permitió interpretar efectivamente un complejo conjunto de datos y pudieron identificar variables sensibles a las prácticas de manejo como así también conocer la interrelación entre las mismas. El análisis multivariado resultó ser un descriptor mucho más poderoso del sistema edáfico que el análisis univariado.

Andrews *et al.* (2002) compararon diferentes métodos de construcción de índices de suelo. Para seleccionar el CMI utilizaron el sistema de opinión de expertos (OE) y el análisis de componentes principales (ACP), como métodos para reducir los indicadores analizados.

Para normalizar los valores de los indicadores se utilizaron los modelos lineales (donde cada variable es normalizada usando el criterio de cuanto mayor mejor, o lo inverso) y no lineales. Finalmente los indicadores fueron combinados mediante la utilización de un índice aditivo (IA), donde los que fueron seleccionados tienen el mismo peso, y el sistema aditivo ponderado (IAP) diferenciándose del propuesto por Karlen *et al.* (1994) en que la ponderación no es arbitraria, sino obtenida mediante herramientas estadísticas. Ambos métodos de selección de indicadores resultaron adecuados.

5. La agricultura y su relación con la calidad del suelo

Según Cairo *et al.* (1996) en el desarrollo de la agricultura es necesario lograr una estabilidad en el ciclo biológico «clima-suelo-planta» para obtener los máximos beneficios de los recursos que se disponen para conservar el medio ambiente y protegerlo.

Un desbalance o desequilibrio en el sistema «suelo-planta» desfavorable para el suelo que conlleva a su degradación en sus condiciones de vida y potencial productivo; por lo tanto existió la necesidad de restituir a los suelos, al menos en

parte, para satisfacer esas necesidades surgieron los abonos orgánicos como complemento y por su forma de obtención y su composición química resultó un material ideal para mantener las propiedades biológicas, físicas y químicas de los suelos y para conservar su capacidad productiva (Paneque y Calaña, 2004).

Los métodos de la agricultura convencional moderna se han basado en prácticas inadecuadas utilizadas en la fertilidad del suelo; entre ellas, la labranza innecesaria o inapropiada, el excesivo uso de productos químicos, la poca diversidad con el empleo de los sistemas de monocultivos e inadecuado manejo de los residuales orgánicos (Kolman y Vázquez, 1996).

Durán (1996) argumenta que al realizar una revisión sobre el manejo ecológico de los suelos tropicales, señala que la temperatura siempre se mantiene elevada en los trópicos y por lo general, los promedios diarios están por encima de los 20 °C, a lo que se une una alta radiación solar, elemento que ejerce una acción degradativa natural sobre el recurso suelo, por lo que se incrementa cuando estos permanecen descubiertos por falta de una cobertura viva o muerta. En estos casos la temperatura puede elevarse en los suelos a más de 55 °C, lo que unido a la influencia directa de los rayos solares, y las lluvias producen efectos degradativos en el suelo.

Autores como Pound (1998) argumenta que la compactación induce cambios en el balance nutricional y por consiguiente en el crecimiento de las plantas, decreciendo la actividad fotosintética como resultado de una pequeña área foliar e inhibición de los estomas. Una caída natural de las hojas y al realizar las podas ayudan a incrementar la disponibilidad de luz, de agua, y de nutrimentos para todos los componentes del sistema.

El suelo es un elemento esencial en la producción agrícola, ya que es un soporte indispensable de los cultivos, nutrientes y reserva de agua. Por lo tanto no se trata de un medio inerte e inestable, sino de un sistema complejo con componentes biológicos, químicos y físicos, interactuando en equilibrio dinámico, donde intervienen diversas prácticas agrícolas (Gómez, 2018).

Buscando restablecer el equilibrio y optando por técnicas de manejo sostenibles y ecológicamente viables se han utilizado muchas alternativas orgánicas en la agricultura cuya utilidad ha sido comprobada por diversos autores. Entre estas prácticas están los abonos orgánicos y entre ellos se resaltan el guano de murciélago, cachaza, compost, humus de lombriz o vermicompost. También se han empleado otros residuos de la agroindustria azucarera, estiércoles de diversa procedencia gallinaza, abonos verdes, residuos industriales (pulpa de café, residuos de destilería, vinaza, etc.) (Rodríguez, 2007).

En un suelo de buena calidad se deben obtener altos rendimientos con cultivos sanos, con un mínimo de impactos negativos sobre el medio ambiente, brindando propiedades estables para la salud de los cultivos y su crecimiento, haciendo frente a condiciones variables de origen natural y humano, principalmente las relacionadas con el clima, o sea, debe ser un suelo flexible y resistir el deterioro (Ascanio, 2004).

El mejoramiento del recurso suelo, su conservación y el menor uso posible de insumos externos son fundamentales para los sistemas orgánicos (Sosa *et al.*, 2004) estableció que en términos generales, los rendimientos de estos sistemas podrían ser entre 10 y 50 % menores que los sistema integrado o los sistema convencional, pero es generalmente aceptado que la producción es más sostenible (sostenibilidad en este sentido se refiere a la perdurabilidad del sistema de producción a través del tiempo, con menos efectos negativos posibles sobre el ambiente natural); por lo tanto, el sobreprecio ofrecido para el producto final se considera suficiente para mitigar la pérdida del rendimiento (George, 2006).

5.1. Los cambios en el uso de la tierra

El uso de la tierra puede ser caracterizado de diversas formas, siendo las más comunes aquellas que comparan un cambio de acuerdo a un uso corriente (agrícola, agrícola-ganadera, forestal, etc.) utilizando un pastizal natural o una situación no cultivada como sistema de referencia (Chenu *et al.*, 2000).

Ha habido intentos para cuantificar el cambio en el uso de la tierra y correlacionarlo con las propiedades del suelo, utilizando el tiempo transcurrido desde que surgió un cambio (e.g. años bajo agricultura, pastura, siembra directa, etc.) en relación a un pastizal natural o una tierra no cultivada (Wilson, 2008).

Sin embargo, este tipo de evaluaciones no considera la transición entre los diferentes tratamientos ya que, en general, se comparan tratamientos muy contrastantes (e.g. agricultura vs. pastizal natural) (Novelli *et al.*, 2011).

La selección de variables de tipo continuas que permitan predecir cambios en las propiedades del suelo debidas al uso de la tierra, puede ser de gran utilidad para detectar tendencias tempranas de cambios en las propiedades del suelo y para facilitar la detección de umbrales de acción. Índices que incluyan la fracción de tiempo anual con cobertura vegetal viva o la frecuencia de un cultivo particular en la secuencia de cultivos pueden ayudar a caracterizar sistemas con diferente intensidad en el uso de la tierra (Novelli *et al.*, 2013).

En este sentido, los pastizales naturales o tierras bajo rotaciones agrícolas-ganaderas que incluyen pasturas cultivadas pueden ser caracterizadas por una elevada fracción de tiempo anual con cobertura viva en comparación con secuencias de cultivos con elevada frecuencia de barbechos, basadas en cultivos anuales (Sasal *et al.*, 2010).

La selección de indicadores que permitan analizar los cambios en el uso de la tierra utilizando una variable continua surge como una herramienta clave para el desarrollo de sistemas agrícolas sustentables así como también para el diseño de potenciales sistemas de monitoreo, los cuales pueden ser de mucha utilidad para el desarrollo de políticas oficiales (Viglizzo *et al.*, 2012).

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en el área del Bloque Experimental de Guaro, perteneciente a la Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar del municipio Mayarí, provincia Holguín con una extensión de 2,028 ha (Figura 1).

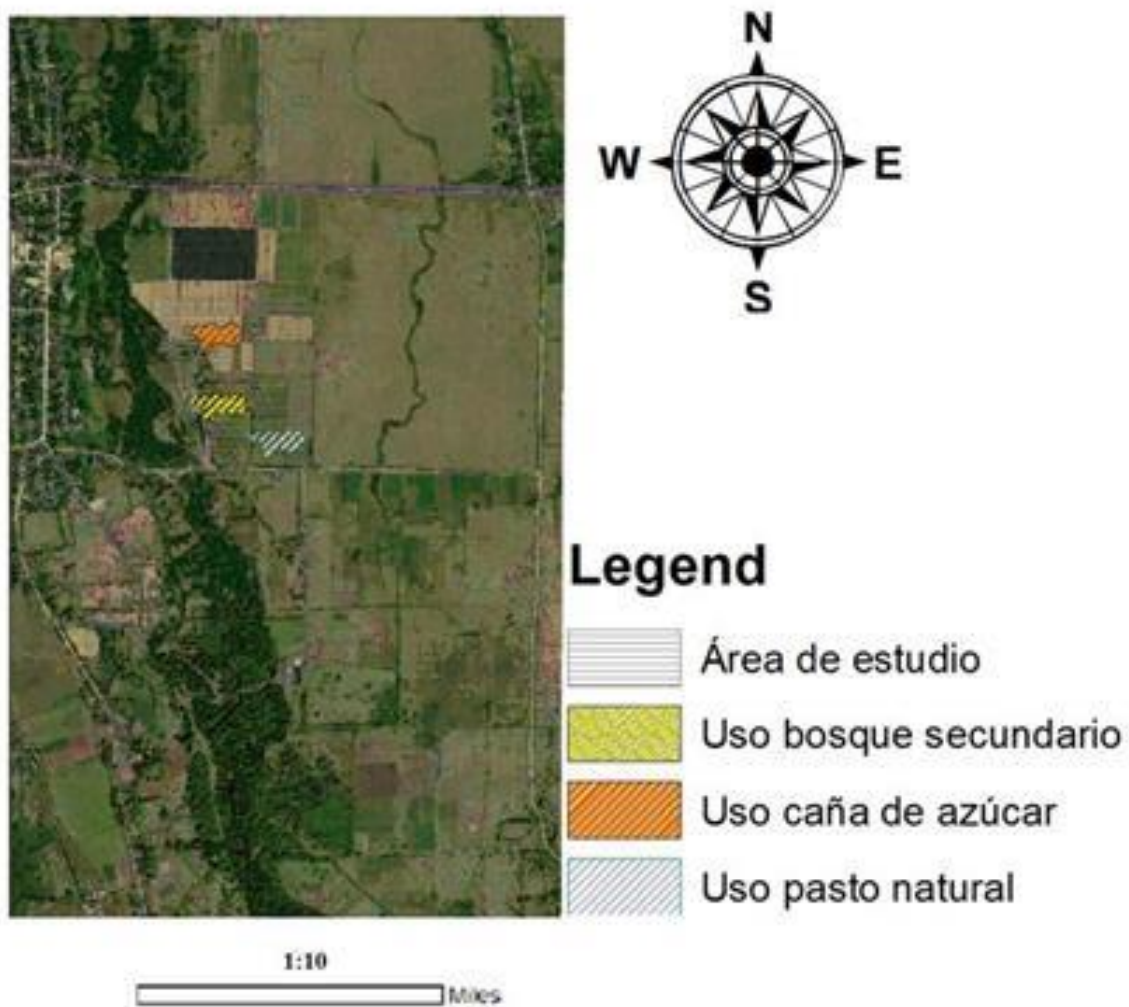


Figura 1. Ubicación del Bloque Experimental de Guaro, perteneciente a la Estación Provincial de Investigaciones de la Caña de Azúcar en Holguín tomada del SAS Planet (SAS.Planet.Nightly.200718.10081/geojamal.com).

El área se encuentra dividida en tres usos de la tierra: pasto natural, caña de azúcar (caña planta) y bosque secundario. Según Hernández *et al.* (2015) el suelo se clasifica como Vertisol Crómico. Las precipitaciones en la zona tienen un

comportamiento medio anual de 1074,9 mm y una temperatura media mensual de 25,3 °C.

Las propiedades físicas del suelo que se determinaron fueron humedad gravimétrica y la densidad aparente por el método descrito por (Bazán, 2017), porosidad total y el aire y agua ocupado en los poros. Dentro de las propiedades químicas que se determinaron fueron el pH, materia orgánica y nitrógeno total por (Villaroel, 1988).

Para la determinación de la resistencia a la penetración se utilizó un penetrómetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf, con la masa impactadora regulada a 0.40 m (Stolf *et al.*, 1983). La transformación de la cantidad de impactos por decímetros (dm) a megapascales (MPa) se realizó a través de la expresión matemática planteada por (Stolf, 1991):

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

Donde *RP* es resistencia a la penetración y *N* es la cantidad de impactos por dm.

Estos resultados fueron expresados en intervalos constantes de profundidad (2 cm) hasta 40 cm, para lo cual se utilizó el programa computacional de datos VBA-Excel propuesto por (Reyes *et al.*, 2019).

En cada punto de muestreo se abrió una calicata de 30 cm de profundidad y tomaron muestras inalteradas de suelo con un cilindro de 105.35 cm³, a las mismas profundidades para las que se estableció la resistencia a la penetración. Las 30 muestras inalteradas se colocaron en pesafiltros, se les determinó la masa de suelo húmedo y se pusieron en una estufa a 105°C, hasta que alcanzaron un peso constante (masa de suelo seco). Con los datos obtenidos se determinó la densidad aparente:

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

Donde *Da* es la densidad aparente, *mss* la masa del suelo seco y *V* el volumen del cilindro.

También se obtuvo la humedad gravimétrica, a partir de la ecuación:

$$\theta_g = \frac{msh - mss}{mss} \quad (3)$$

Donde θ_g es la humedad gravimétrica; msh la masa del suelo húmedo y mss la masa del suelo seco.

Se determinó la humedad volumétrica (θ_v) para la determinación de la porosidad total del suelo siguiendo las ecuaciones:

$$\theta_v = \frac{\theta_g}{Da} \quad (4)$$

La porosidad total del suelo (P_t) se obtuvo por la ecuación:

$$P_t = \frac{Da}{\theta_v} \quad (5)$$

La porosidad total del suelo ocupado por el agua (P_{ta}):

$$P_{ta} = \frac{\theta_v}{P_t} \quad (6)$$

La porosidad total del suelo ocupado por el aire (P_{tai}):

$$P_{tai} = \frac{P_t}{P_{ta}} \quad (7)$$

Los paquetes estadísticos utilizados para el análisis descriptivo de datos y el análisis multivariado fueron el Minitab 2017 y el Statgraphics Plus 5, a los cuales se les realizaron las pruebas siguientes: Análisis de Componentes Principales (ACP) y la correlación cofenética, Análisis Discriminante (AD) y la Correlación Canónica con la clasificación cruzada.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de estadística descriptiva para las propiedades físicas y químicas en los diferentes usos de la tierra se muestra en la Tabla 1. Se pudo observar que el mayor contenido medio de carbono se encontró en el pasto natural, seguido por la caña de azúcar y el bosque secundario respectivamente y concuerda con lo planteado por Xu *et al.* (2013) que el contenido de carbono en suelos es diferente en los ecosistemas por los cultivos agrícolas que presentan e indica que en esos suelos se ha perdido la MO usada por los microorganismos como fuente de carbono.

Tabla 1. Estadística descriptiva de las propiedades físicas y químicas analizadas en los diferentes usos de la tierra.

| | Propiedades químicas | | | | Propiedades físicas | | | | | |
|--------------------------|----------------------|-------|-------|-------|---------------------|-------|------|------|-------|------|
| Descriptivos | C | M.O | pH | Nt | Rp | Hg | Pt | Ptai | Pta | Da |
| Bosque secundario | | | | | | | | | | |
| Media | 65,77 | 5,57 | 6,64 | 0,28 | 2,42 | 26,00 | 0,65 | 0,39 | 0,26 | 1,01 |
| E.E | 0,27 | 0,36 | 0,14 | 0,07 | 0,30 | 0,88 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| C.V (%) | 57,88 | 57,15 | 66,40 | 73,15 | 37,64 | 19,53 | 3,83 | 8,57 | 16,57 | 7,03 |
| D.E | 57,80 | 4,07 | 0,42 | 0,20 | 0,91 | 0,05 | 0,02 | 0,03 | 0,04 | 0,07 |
| Me | 86,24 | 4,44 | 6,68 | 0,22 | 2,04 | 28,00 | 0,65 | 0,38 | 0,27 | 1,00 |
| Caña de azúcar | | | | | | | | | | |
| Media | 87,40 | 2,96 | 7,78 | 0,20 | 1,20 | 40,00 | 0,69 | 0,35 | 0,34 | 0,87 |
| E.E | 0,57 | 1,09 | 0,11 | 0,05 | 0,08 | 0,99 | 0,01 | 0,03 | 0,02 | 0,04 |

| | | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|
| C.V(%) | 12,26 | 82,97 | 4,16 | 82,97 | 20,13 | 7,41 | 5,51 | 29,03 | 17,35 | 12,45 |
| D.E | 10,72 | 3,28 | 0,32 | 0,16 | 0,24 | 0,03 | 0,04 | 0,10 | 0,06 | 0,11 |
| Me | 82,95 | 5,68 | 7,70 | 0,28 | 1,22 | 0,40 | 0,70 | 0,32 | 0,37 | 0,87 |

Pasto natural

| | | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| Media | 93,91 | 3,36 | 8,17 | 0,12 | 2,10 | 32,00 | 0,68 | 0,38 | 0,29 | 0,92 |
| E.E | 0,38 | 0,87 | 0,06 | 0,04 | 0,09 | 1,29 | 0,02 | 0,03 | 0,02 | 0,06 |
| C.V(%) | 10,81 | 10,73 | 2,12 | 90,73 | 12,14 | 11,99 | 8,65 | 26,75 | 17,30 | 18,34 |
| D.E | 10,15 | 2,61 | 0,17 | 0,13 | 0,26 | 0,04 | 0,06 | 0,10 | 0,05 | 0,17 |
| Me | 96,33 | 2,66 | 8,20 | 0,13 | 2,05 | 0,33 | 0,66 | 0,37 | 0,30 | 0,97 |

***E.E: Error Estándar; C.V: Coeficiente de Variación; D.E: Desviación Estándar;
Me: Mediana.***

Todas las propiedades presentan un coeficiente de variación que se clasifica de relativamente heterogéneo con valores mayores al 20% hasta extremadamente heterogéneos con valores superiores al 60% (Vázquez, 2009).

El contenido medio de materia orgánica fue mayor en el uso de bosque secundario con un 5,57%, lo que puede estar dado porque en ellos ocurre una mayor actividad microbiana en la descomposición de los restos orgánicos mientras que en el uso con caña de azúcar presentó el menor contenido con 2,96% debido a que la descomposición de la biomasa ocurre más lento por el alto contenido de lignina que presenta este cultivo y además las prácticas agrícolas que se le realizan durante su establecimiento y cosecha deterioran el contenido de esta propiedad en el suelo. El pH presentó valores óptimos para estos usos de la tierra, y el contenido alto de nitrógeno total mayor que 0,2%.

Dentro de las propiedades físicas la Rp el menor comportamiento fue en el uso con caña de azúcar con 1,10 MPa, lo que según Arshad *et al.* (1996) atendiendo al grado de clasificación se clasifica como moderada la compactación del suelo no siendo así para los usos de pasto natural (2,10 MPa) y bosque secundario (2,32 MPa) lo que indica una alta compactación.

En el caso de los Vertisoles, los valores de densidad aparente están determinados en gran parte por la presencia de arcillas del tipo montmorillonita y dependen de si las muestras se toman durante el ciclo húmedo o seco basados en muestras pequeñas los valores de densidad aparente en Vertisoles oscilan entre 1,3 y 2,0 Mg.m⁻³ (Wilding *et al.*, 1983).

Los valores de porosidad total son similares en todos los usos de la tierra, el espacio ocupado por el agua y el aire hace que se pueda clasificar la porosidad en muy baja (FAO, 2009), incidiendo en los valores obtenidos de humedad gravimétrica debido que en suelos arcillosos el contenido de agua es el factor más importante mientras que en suelos arenosos los parámetros mecánicos son menos dependientes de la condición inicial de humedad y más dependientes de la densidad aparente inicial.

Los indicadores de la calidad del suelo en un sitio dado podrían así ser en comparación con los del sitio de referencia, así como con el valor medio, y Percentiles de 5% y 95% de todos los sitios bajo un uso de suelo dado, con el percentiles dados como un medio para expresar la distribución de frecuencias. Un inconveniente importante de este enfoque es que la referencia puede no estar en un óptimo en todos los parámetros (Rutgers *et al.*, 2016).

Los valores aceptables para un indicador también se pueden definir como aquellos en que no hay pérdida o deterioro significativo del funcionamiento (Loveland y Thompson, 2002).

Además, rangos aceptables de un indicador de calidad del suelo para una propiedad o proceso a menudo dependen en gran medida del valor de otra

propiedad del suelo o proceso, p. dependencia de la biomasa microbiana o del carbono orgánico del suelo textura del suelo (Johannes et al., 2017).

Se ha afirmado que la interpretación de los indicadores de calidad del suelo, es decir, el establecimiento de rangos objetivo o viables, siempre permanecerá polémico, que se debe en parte a la falta de datos, en parte a la patrón curvilíneo que siguen muchos indicadores y en parte porque el el uso del juicio de expertos es polémico en sí mismo (Merrington, 2006).

A enfoque comparativo en el que los valores de los indicadores o puntajes de un punto de muestreo se ponen en relación con otros puntos de muestreo puede ser el base más intuitiva y flexible para la interpretación, ya que da una evaluación relativa (por ejemplo, 25% superior) y permite la evolución continua de la sistema (Bünemann et al., 2018).

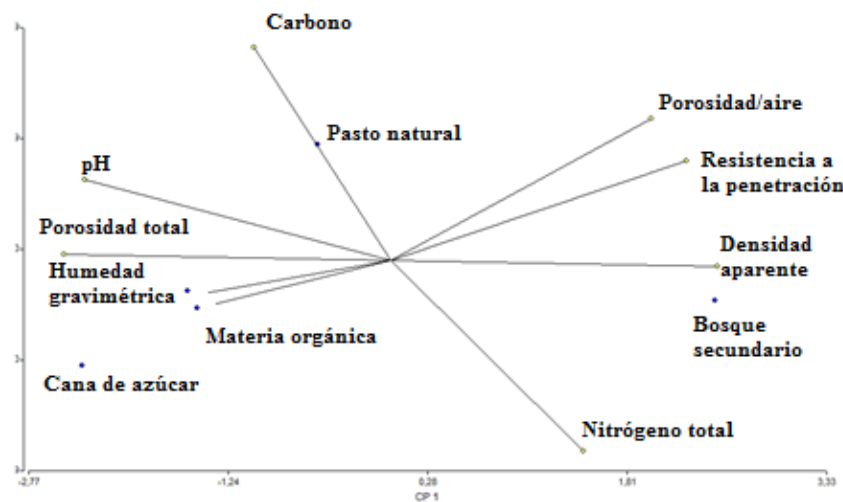


Figura 2. Análisis de componentes principales de propiedades físicas y químicas en los diferentes usos de la tierra.

La Figura 2 muestra el análisis de Componentes Principales para las propiedades físicas y químicas en los diferentes usos de la tierra. En este se pudo observar que en el caso del bosque secundario presenta una mayor correlación con la densidad aparente, mientras que la resistencia a la penetración, la porosidad ocupada por el

aire y la densidad aparente pudiesen formar un grupo con el uso de la tierra en bosque secundario.

Estas propiedades presentan correlación negativa con la humedad gravimétrica, la materia orgánica, la porosidad total y el pH que a su vez presentan una mayor correlación con el uso del suelo con caña de azúcar.

El carbono fue mejor clasificado para formar un posible grupo con el pasto natural, mientras que el nitrógeno total no presenta correlación negativa con esta propiedad química y no se clasificó en ninguno de los usos de la tierra analizados.

El adecuado manejo de los conceptos sobre estos temas debe redundar en un mejor manejo de la sostenibilidad del recurso, de la agricultura sostenible y en la toma de decisiones de políticas de uso del suelo. El desarrollo de indicadores de calidad del suelo deber basarse en el uso de este recurso y en la relación entre los indicadores y la función del suelo que se esté evaluando. Deben considerarse propiedades edáficas que cambien en un periodo de tiempo relativamente corto.

La correlación cofenética de las propiedades físicas y químicas determinadas para cada uso de la tierra se ilustra en la Tabla 2, indica que las determinaciones para los casos del pH (94,00 %), humedad gravimétrica (97,00%), resistencia a la penetración (90,00 %), la materia orgánica (0,89 %) y la densidad aparente (100 %) tienen una alta confiabilidad encontrándose en la primera componente y con valores superiores al 50,00 %.

Tabla 2. Correlación cofenética de las propiedades físicas y químicas analizadas en los diferentes usos de la tierra.

| Propiedades | CP1 | CP2 |
|--------------------|------------|------------|
| pH | 0,94 | 0,35 |
| Carbono | 0,42 | 0,91 |

| | | |
|----------------------|------|------|
| Materia orgánica | 0,89 | 0,81 |
| Nitrógeno total | 0,54 | 0,84 |
| Humedad gravimétrica | 0,97 | 0,24 |
| Densidad aparente | 1,00 | 0,03 |
| Porosidad total | 0,06 | 0,03 |
| Porosidad/aire | 0,22 | 0,35 |
| Porosidad/agua | 0,24 | 0,38 |
| Rp | 0,90 | 0,43 |

Las propiedades asociadas a la porosidad, el carbono y el nitrógeno total no mostraron en ninguna de las dos componentes confiabilidad en la determinación por lo que no existe correlación en las propiedades analizadas.

El grupo uno estaría compuesto por las propiedades siguientes: pH, humedad gravimétrica, densidad aparente, materia orgánica y resistencia a la penetración; y el grupo dos integrado por el carbono, la materia orgánica, nitrógeno total y el espacio ocupado por el agua y el aire en los poros.

En virtud de que existen muchas propiedades alternativas para evaluar la calidad del suelo (Seybold *et al.*, 2018) plantearon un conjunto mínimo de propiedades del suelo para ser usadas como indicadores para evaluar los cambios que ocurren en el suelo con respecto al tiempo: la textura, profundidad del suelo, densidad aparente, materia orgánica, nitrógeno y carbono total, pH y conductividad eléctrica.

En la Tabla 3 se muestra la correlación canónica entre las propiedades físicas y químicas con los usos de la tierra analizados. La primera correlación canónica R

es 0,90; correspondiente a la correlación entre el primer par de variables canónicas, L(1). El valor $R^2 = 0,82$ indica que el 82% de la variabilidad de los datos es explicada por dicha correlación.

Tabla 3. Correlación canónica entre las propiedades físicas y químicas; y el uso de la tierra.

| Correlaciones canónicas | L1 |
|-------------------------|---------|
| R | 0,90 |
| R^2 | 0,82 |
| Lambda | 35,64 |
| gl | 8,00 |
| Significación | 2,0E-05 |

Para la prueba de hipótesis, la primera correlación canónica y todas las restantes son iguales a cero en la población, se basa en el estadístico lambda con 8 grados de libertad, por lo que una correlación canónica sería suficiente para medir la asociación, a nivel de usos de la tierra, entre las propiedades físicas y químicas. La prueba de homogeneidad de matrices de covarianzas (Tabla 3), arrojó un valor $p < 0.001$, sugiriendo que no se cumple este supuesto y que pudiera existir una función discriminante cuadrática que exprese mejor los valores.

Los centroides en el espacio discriminante o medias de las funciones por grupo, muestran que el Grupo 1 se opone al otro grupo en el eje canónico 1, indicando que las diferencias permiten discriminar observaciones del grupo 1 respecto al grupo 2 con muy poca variación explicada sobre este eje es 15,91%.

Tabla 4. Análisis discriminante de las propiedades físicas y químicas en los diferentes usos de la tierra.

| Autovalores | | |
|--|-------|-------------|
| Autovalores | % | % acumulado |
| 10,89 | 84,09 | 84,09 |
| 2,06 | 15,91 | 100 |
| Prueba de homogeneidad de matrices de covarianza | | p <0,001 |
| Centroides en el espacio discriminante | | |
| Grupo | Eje 1 | Eje 2 |
| 1,00 | -4,34 | 0,32 |
| 2,00 | 2,81 | 1,47 |
| 3,00 | 1,53 | -1,79 |

La Tabla 5 muestra la clasificación cruzada en filas que se representa el grupo al que pertenece la observación y en columnas el grupo al que es asignada la misma observación al usar la función discriminante. Señala que de las 8 propiedades del suelo analizadas del Grupo 1; 8 fueron bien clasificadas, con una tasa de error de clasificación en este grupo de 11,11%. En el Grupo 2; 9 propiedades fueron asignadas bien con una tasa de error del 0,00%.

Tabla 5. Clasificación cruzada de las propiedades físicas y químicas en los diferentes usos de la tierra.

| Grupo | 1,00 | 2,00 | 3,00 | Total | Error(%) |
|--------------|------|------|------|--------------|-----------------|
| 1,00 | 8 | 0 | 1 | 9 | 11,11 |
| 2,00 | 0 | 9 | 0 | 9 | 0,00 |
| Total | 8 | 9 | 1 | 18 | 7,41 |

En un estudio realizado por Estrada *et al.* (2017) en suelos degradados de la Mixteca Alta Oaxaqueña de México propone utilizar como indicadores de calidad del suelo a la materia orgánica y los aniones fósforo extraíble, potasio y magnesio.

También el indicador de calidad de pH fue usado por Chun-Juan *et al.* (2013) en su estudio de tipos de suelo y Arshad y Coen (1992) refieren que los indicadores disponibles para evaluar la calidad de suelo pueden variar de localidad a localidad dependiendo del tipo y uso, función y factores de formación del suelo. La identificación efectiva de indicadores apropiados para evaluar la calidad del suelo depende del objetivo, que debe considerar los múltiples componentes de la función del suelo, en particular, el productivo y el ambiental.

La identificación es compleja por la multiplicidad de factores químicos, físicos y biológicos que controlan los procesos biogeoquímicos y su variación en intensidad con respecto al tiempo y espacio (Doran *et al.*, 1996)

CONCLUSIONES

De las propiedades determinadas en los diferentes usos de la tierra se puede concluir que para este tipo de suelo estudiado pueden ser utilizadas como indicadores de calidad del suelo en los diferentes usos, las propiedades que mostraron una mayor correlación cofenética y mejor clasificadas en el análisis discriminante; el pH, la humedad gravimétrica, la densidad aparente, la materia orgánica y la resistencia a la penetración.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acton, D. F., & Padbury, G. A. (1993). A conceptual framework for soil quality assessment and monitoring. In "A Program to Assess and Monitor Soil Quality in Canada"(DF Acton, ed.), Soil Quality Evaluation Program Summary (interim), Centre for Land and Biological Resources Research, No. 93–49. *Agriculture Canada, Ottawa*.
- Aguilera, M., & Martínez, R. (1980). Relaciones agua-suelo-planta-atmósfera, Universidad Autónoma de Chapingo. *Chapingo, México*.
- Alejo Santiago, Gelacio., Salazar Jara, F. I., Garcia Paredes, J. D., Arrieta Ramos, B. G., Jimenez Meza, V. I. C. T. O. R., & Sanchez Monteon, A. L. (2012). Degradacion fisico-quimica de suelos agricolas en San Pedro Lagunillas, Nayarit.
- Álvarez, J. L. (2002). Caracterización y manejo de los principales factores edáficos limitantes de la agro-productividad de los suelos. *Facultad de Agronomía, Universidad de Matanzas «Camilo Cienfuegos»*. Matanzas, Cuba.
- Amézquita Collazos, E., Hernández, E., & Moreno, O. J. (1996). Influencia de la profundidad de la compactación en la productividad de hortalizas en un suelo ándico de la sabana de Bogotá.
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Cambardella, C. A. (2004). The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. *Soil Science Society of America Journal*, 68(6), 1945-1962.
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Mitchell, J. P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, ecosystems & environment*, 90(1), 25-45.
- Andrews, S. S., Karlen, D. L., & Mitchell, J. P. (2002). A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. *Agriculture, ecosystems & environment*, 90(1), 25-45.
- Andriulo, A. E., & Irizar, A. B. (2017). *La materia orgánica como indicador base de calidad del suelo*. EEA Paraná.

- Arshad, M. A., & Coen, G. M. (1992). Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7(1-2), 25-31.
- Arshad, M. A., Lowery, B., & Grossman, B. (1997). Physical tests for monitoring soil quality. *Methods for assessing soil quality*, 49, 123-141.
- Ascanio, N. (2004). Reseña del uso y manejo agroecológico de los suelos, situación actual. *página Web: www. gacicuba. net. Consultado*, 5-12.
- Bastida, F., Zsolnay, A., Hernández, T., & García, C. (2008). Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective. *Geoderma*, 147(3-4), 159-171.
- Bazán Tapia, R. (2017). Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego.
- Benintende, S. M., Benintende, M. C., Sterren, M. A., Saluzzio, M. F., & Barbagelta, P. A. (2017). Indicadores biológicos: selección, determinación de niveles de referencia y utilización en la construcción de índices. *Ciencia del suelo*, 35(1), 35-46.
- Blair, G. J., Lefroy, R. D., & Lisle, L. (1995). Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian journal of agricultural research*, 46(7), 1459-1466.
- Blanco-Sepúlveda, R. (2009). La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo. *Agrociencia*, 43(3), 231-239.
- Bongiovanni, M. D., & Lobartini, J. C. (2006). Particulate organic matter, carbohydrate, humic acid contents in soil macro-and microaggregates as affected by cultivation. *Geoderma*, 136(3-4), 660-665.
- Bremer, E., & Ellert, K. (2004). *Soil quality indicators: A review with implications for agricultural ecosystems in Alberta*. AESA.

- Bünemann, E. K., Bongiorno, G., Bai, Z., Creamer, R. E., De Deyn, G., de Goede, R., ... & Brussaard, L. (2018). Soil quality—A critical review. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 105-125.
- Buol, S. W., & Stokes, M. L. (1997). Soil profile alteration under long-term, high-input agriculture. *Replenishing soil fertility in Africa*, 51, 97-109.
- Buschiazzo, D. E., Panigatti, J. L., & Unger, P. W. (1998). Tillage effects on soil properties and crop production in the subhumid and semiarid Argentinean Pampas. *Soil and Tillage Research*, 49(1-2), 105-116.
- Cairo, P., & Fundora, O. (2005). Edafología Primera y Segunda Parte. *Editorial Félix Varela, Ciudad de la Habana, Cuba*.
- Campos Magaña, S. G., López López, J. A., Cadena Zapata, M., Reynolds Chávez, M. A., Cuervo Piña, N., & Ramírez Fuentes, G. (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(2), 119-128.
- Cândido, B. M., Silva, M. L. N., Curi, N., & Batista, P. V. G. (2014). Erosão hídrica pós-plantio em florestas de eucalipto na bacia do rio Paraná, no leste do Mato Grosso do Sul. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38, 1565-1575.
- Cantú, M. P., Becker, A., Bedano, J. C., & Schiavo, H. F. (2007). Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del suelo*, 25(2), 173-178.
- Cerisola, C. I., García, M. G., & Filgueira, R. R. (2005). Distribución de la porosidad de un suelo franco arcilloso (alfisol) en condiciones semiáridas después de 15 años bajo siembra directa. *Ciencia del suelo*, 23(2), 167-178.
- Chenu, C., Le Bissonnais, Y., & Arrouays, D. (2000). Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal*, 64(4), 1479-1486

- Chun-Juan, B. I., Zhen-Lou, C. H. E. N., Jun, W. A. N. G., & Dong, Z. H. O. U. (2013). Quantitative assessment of soil health under different planting patterns and soil types. *Pedosphere*, 23(2), 194-204.
- Ciancio, A., & Gamboni, M. (2017). Soil biodiversity and tree crops resilience. In *Soil Biological Communities and Ecosystem Resilience* (pp. 321-343). Springer, Cham.
- Corella Morales, T. R., Andérez Velázquez, M., Taboada-Castro, M. M., & Taboada-Castro, M. T. (2002). Principales aspectos edafológicos de la provincia de Holguín (Cuba). Uso y manejo de los suelos.
- Debelis, S. (2011). Evaluación de tierras. FCA-UNLZ.
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1994). Defining and assessing soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*, 35, 1-21.
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1997). Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. *Methods for assessing soil quality*, 49, 25-37.
- Druille, M., Castiglioni, M., & Massobrio, J. M. (2013). Fracción erosionable del suelo en el oeste Bonaerense bajo sistemas de uso de la tierra contrastantes. *Ciencia del suelo*, 31(1), 125-132.
- Duran, J. L. (1998). Degradación y manejo ecológico de los suelos tropicales, con énfasis en los de Cuba. *Agricultura orgánica*, 1, 7-10.
- Duval, M. E., Galantini, J. A., Iglesias, J. O., Canelo, S., Martínez, J. M., & Wall, L. (2013). Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil and Tillage Research*, 131, 11-19.
- Ellies, A., & Mac Donald, R. (1988). Efecto de la densidad de pastoreo sobre la resistencia a la penetración en un Palehumult de Chile. *Ciencia del Suelo*, 6(2), 113-119.
- Estrada-Herrera, I. R., Hidalgo-Moreno, C., Guzmán-Plazola, R., Almaraz Suárez, J. J., Navarro-Garza, H., & Etchevers-Barra, J. D. (2017). Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*, 51(8), 813-831.

- Fabrizzi, K., Picone, L., Berardo, A., & García, F. (1998). Efecto de la fertilización nitrogenada y fosfatada en las propiedades químicas de un Argiudol Típico. *Ciencia del Suelo*, 16(2), 71-76.
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2009). Guía para la descripción de suelos.
- FAO, U. C. E. (1995). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Ferreras, L. A., Ferrarri, M. C., Magra, G. C., Brignone, F. S., & Rivoltella, L. A. (2014). Evaluación de la calidad del suelo bajo distintos sistemas de cultivo. In *XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca, Argentina*.
- Ferreras, L., Toresani, S., Bonel, B., Fernández, E., Bacigaluppo, S., Faggioli, V., & Beltrán, C. (2009). Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. *Ciencia del suelo*, 27(1), 103-114.
- Forsythe, W., Sancho, F., & Villatoro, M. (2005). Efecto de la compactación de suelos sobre el rendimiento del maíz en tres localidades de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 29(3), 175-185.
- Gabioud, E. A., Wilson, M. G., & Sasal, M. C. (2011). Análisis de la estabilidad de agregados por el método de Le Bissonnais en tres órdenes de suelos. *Ciencia del suelo*, 29(2), 129-139.
- Galantini, J. A., & Rosell, R. A. (1994). *Modelos de simulación de la dinámica de la materia orgánica en suelos de la región semiárida bonaerense* (No. 631.4170184). Universidad Nacional del Sur..
- Galantini, J. A., & Suñer, L. (2008). Las fracciones orgánicas del suelo: análisis en los suelos de la Argentina. *Agriscientia*, 25(1), 41-55.
- Galantini, J. A., Rosell, R. A., Brunetti, G., & Senesi, N. (2002). Dinámica y calidad de las fracciones orgánicas de un Haplustol durante la rotación trigo-leguminosas. *Ciencia del suelo*, 20(1), 17-26.

- George, A. (2006). Estudio comparativo de indicadores de calidad de suelo en fincas de café orgánico y convencional en Turrialba, Costa Rica.
- Ghaemi, M., Astaraei, A. R., Emami, H., Nassiri Mahalati, M., & Sanaeinejad, S. H. (2014). Determining soil indicators for soil sustainability assessment using principal component analysis of Astan Quds-east of Mashhad-Iran. *Journal of soil science and plant nutrition*, 14(4), 1005-1020.
- Gómez Pérez, L. A. (2018). *Caracterización de un suelo Pardo mullido medianamente lavado dedicado a la producción de hortalizas en casas de cultivo* (Doctoral dissertation, Universidad Central" Marta Abreu de Las Villas. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Departamento de Agronomía).
- Greenland, D. J. (1979). Structural organization of soils and crop production. *Soil physical properties and crop production in the tropics*, 47-56.
- Gregorich, E. G., Carter, M. R., Angers, D. A., Monreal, C., & Ellert, B. H. (1994). Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian journal of soil science*, 74(4), 367-385.
- Haydu-Houdeshell, C. A., Graham, R. C., Hendrix, P. F., & Peterson, A. C. (2018). Soil aggregate stability under chaparral species in southern California. *Geoderma*, 310, 201-208.
- Heredia, O. S. (2008). Cambios en el uso de la tierra y el clima sobre las propiedades químicas de los suelos de Gral. In *Viamonte, Buenos Aires, Argentina. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis, Argentina.*
- Hernández Jiménez, A., Llanes Hernández, V., López Pérez, D., & Rodríguez Cabello, J. (2014). Características de vertisoles en áreas periféricas de La Habana. *Cultivos Tropicales*, 35(4), 68-74.
- Hernández, J. A., Pérez, J. J. M., Bosch, I. D., & Castro, S. N. (2015). Clasificación de los suelos de Cuba 2015. *Mayabeque, Cuba: Ediciones INCA*, 93, 91.
- Iglesias, J. O., Galantini, J. A., AM, M., Landriscini, M. R., & Rosell, R. A. (1998). Cambios en la distribución del espacio poroso debidos al sistema de

- labranza y al tránsito en un Hapludol típico de la Región Subhúmeda Argentina. *Rev. Facultad de Agronomía*, 18(1-2), 19-26.
- Imaz, L. (2021). *Evaluación de la calidad del suelo en una explotación lechera del valle inferior del río Negro* (Doctoral dissertation).
- Ingaramo, O., Paz, A., & Dugo, M. (2003). Evaluación de la densidad aparente en diferentes sistemas de laboreos de suelo, en el NO de la Península Ibérica. *Argentina: Comunicaciones Científicas y tecnológicas. Universidad Nacional del Nordeste*. 4p.
- Jaramillo, D. F. (2002). Introducción a la ciencia del suelo.
- Johannes, A., Matter, A., Schulin, R., Weiskopf, P., Baveye, P. C., & Boivin, P. (2017). Optimal organic carbon values for soil structure quality of arable soils. Does clay content matter?. *Geoderma*, 302, 14-21.
- Jordán, A. (2005). Manual de edafología. Departamento de Cristalografía, Mineralogía y Química. Agrícola de la Universidad de Sevilla.
- Karlen, D. L., & Stott, D. E. (1994). A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. *Defining soil quality for a sustainable environment*, 35, 53-72.
- Karlen, D. L., Mausbach, M. J., Doran, J. W., Cline, R. G., Harris, R. F., & Schuman, G. E. (1997). Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 4-10.
- Klingebiel, A. A. (1962). *Clasificación por capacidad de uso de las tierras* (No. Folleto 158). EUA Department of Agriculture.
- Kolmans, E., & Vásquez, D. (1996). Manual de agricultura ecológica. *Una introducción a los principios básicos y su aplicación. MAELA-SIMAS. Nicaragua*, 59-222.
- Lal, R. (2002). Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. *Environmental pollution*, 116(3), 353-362.

- Larson, W. E., & Pierce, F. J. (1994). The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. *Defining soil quality for a sustainable environment*, 35, 37-51.
- Liebig, M. A., Varvel, G. E., Doran, J. W., & Wienhold, B. J. (2002). Crop sequence and nitrogen fertilization effects on soil properties in the western Corn Belt. *Soil Science Society of America Journal*, 66(2), 596-601.
- Loveland, P. J., & Thompson, T. R. E. (Eds.). (2002). *Identification and development of a set of national indicators for soil quality*. Environment Agency.
- Lu, J., Jiang, P., Wu, L., & Chang, A. C. (2008). Assessing soil quality data by positive matrix factorization. *Geoderma*, 145(3-4), 259-266.
- Malavolta, E., Vitti, G. C., & Oliveira, S. A. D. (1997). Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações.
- Marín, G. (2011). Edafología 1. *Espacio Gráfico Comunicaciones SA Caldas-Colombia*.
- Martí, J. J. I., López, A. S., & Olivera, D. (2012). Biodiversidad y edafodiversidad: cuestión de coincidencia?. *Spanish Journal of Soil Science: SJSS*, 2(3), 8-12.
- Masto, R. E., Chhonkar, P. K., Singh, D., & Patra, A. K. (2007). Soil quality response to long-term nutrient and crop management on a semi-arid Inceptisol. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 118(1-4), 130-142.
- Merrington, G., Fishwick, S., Barraclough, D., Morris, J., Preedy, N., Boucard, T., ... & Fang, C. (2006). The development and use of soil quality indicators for assessing the role of soil in environmental interactions. *Report to UK SIC, SC030265, Environment Agency*.
- Michéli, E., Schad, P., Spaargaren, O., Dent, D., & Nachtergaele, F. (2006). World reference base for soil resources: A framework for International Classification, correlation and communication. *FAO (Food and Agriculture Organization)*.

- Miguel Fernández, C. D., & Sánchez Sánchez, Y. (2011). Factores hidrogeológicos que influyen en la salinidad de los suelos. Ejemplo de estudio Valle del Cauto provincia Holguín.
- Morvan, X., Saby, N. P. A., Arrouays, D., Le Bas, C., Jones, R. J. A., Verheijen, F. G. A., ... & Kibblewhite, M. G. (2008). Soil monitoring in Europe: a review of existing systems and requirements for harmonisation. *Science of the total environment*, 391(1), 1-12.
- Muñiz, O. (2001). Los sistemas integrados de nutrición vegetal. *Memorias del II Taller de Suelos. Proyecto Biopreparados. San Antonio de los Baños*, 5-6.
- Narváez, H., Combatt, E., & Bustamante Barrera, I. (2014). Distribución espacial de la salinidad en suelos del área de influencia de la desembocadura del río Sinú (Córdoba, Colombia). *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 17(2), 433-443.
- Novelli, L. E., Caviglia, O. P., & Piñeiro, G. (2017). Increased cropping intensity improves crop residue inputs to the soil and aggregate-associated soil organic carbon stocks. *Soil and Tillage Research*, 165, 128-136.
- Novelli, L. E., Caviglia, O. P., Wilson, M. G., & Sasal, M. C. (2013). Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma*, 195, 260-267.
- Osinaga, N., Castro, J. E., Alvarez, C. R., & Taboada, M. A. (2014). ¿Cómo influye la agriculturización sobre la calidad edáfica en el Chaco Subhúmedo. In *XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Bahía Blanca, Argentina*.
- O'Sullivan, L., Creamer, R. E., Fealy, R., Lanigan, G., Simo, I., Fenton, O., ... & Schulte, R. P. (2015). Functional Land Management for managing soil functions: A case-study of the trade-off between primary productivity and carbon storage in response to the intervention of drainage systems in Ireland. *Land use policy*, 47, 42-54.

- Otero, L., Morales, R., Vento, M., Sánchez, I., Cintra, M., & Rivero, L. (2011). Salinidad del suelo: un problema que incumbe a todos. *Agricultura Orgánica*, 17(1), 33-34.
- Paneque, V. M., & Calaña, J. M. (2004). Abonos Orgánicos, conceptos prácticos para su evaluación y aplicación. *Folleto Técnico. Asociación Cubana de técnicos Agrícolas y forestales. La Habana, Cuba*, 54.
- Picone, L. I. (2006). Propiedades del suelo relacionadas con la fertilidad. *Fertilidad de suelo y Fertilización de Cultivos* (eds. HE Echeverría & FO García). Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina, 3-18.
- Pierce, F. J., & Larson, W. E. (1993, May). Developing criteria to evaluate sustainable land management. In *Proceedings of the eighth international soil management workshop: utilization of soil survey information for sustainable land use* (pp. 7-14). US Dept. Agr., Soil Cons. Serv., Lincoln, NE. May.
- Porta Casanellas, J., López-Acevedo Reguerín, M., & Roquero de Laburu, C. (1994). Edafología para la agricultura y el medio ambiente.
- Pound, B. (1998). Cultivos de cobertura para la agricultura sostenible en América. *FAO, Roma, ITA*.
- Quiroga, A. (2004). Aspectos del manejo del agua y la fertilidad en molisoles de la región semiárida pampeana.
- Reeves, D. W. (1997). The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil and Tillage Research*, 43(1-2), 131-167.
- Reyes, R. A. G., Gómez, J. A. V., Menéndez, A. M. M., & Sánchez, E. V. (2019). Efecto de la cosecha mecanizada sobre la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración. *Revista Ingeniería Agrícola*, 9(2).
- Riquier, J., Bramao, D. L., & Cornet, J. P. (1970). A new system of soil appraisal in terms of actual and potential productivity (first approximation). *A new system of soil appraisal in terms of actual and potential productivity (first approximation)*.

- Rodríguez, I. (2007). *El cultivo continuado de la caña de azúcar y su influencia sobre algunas propiedades químicas de un suelo Pardo Sialítico, bajo diferentes regímenes de cobertura y fertilización* (Doctoral dissertation, Tesis en opción al título académico de Master en Agricultura Sostenible. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Facultad de Ciencias Agropecuarias).
- Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce De León, J., & Hill, M. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*. Universidad de la República. Montevideo, Uruguay. *Online [Sep 2016]*.
- Rutgers, M., Wouterse, M., Drost, S. M., Breure, A. M., Mulder, C., Stone, D., ... & Bloem, J. (2016). Monitoring soil bacteria with community-level physiological profiles using Biolog™ ECO-plates in the Netherlands and Europe. *Applied Soil Ecology*, 97, 23-35.
- Safaei, M., Bashari, H., Mosaddeghi, M. R., & Jafari, R. (2019). Assessing the impacts of land use and land cover changes on soil functions using landscape function analysis and soil quality indicators in semi-arid natural ecosystems. *Catena*, 177, 260-271.
- Salamanca, A., & Sadeghian, S. (2006). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana.
- Salgado, E. (2001). *Relación suelo-planta-agua*. Ediciones Universitarias de la Universidad Católica de Valparaíso. Valparaíso.
- Sánchez, J. (2007). Fertilidad del suelo y nutrición mineral de plantas. *FERTITEC SA*, 1-19.
- Sasal, M. C., Castiglioni, M. G., & Wilson, M. G. (2010). Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural-rainfall erosion plots under no tillage. *Soil and Tillage Research*, 108(1-2), 24-29.
- Seybold, C. A., Mansbach, M. J., Karlen, D. L., & Rogers, H. H. (2018). Quantification of soil quality. In *Soil processes and the carbon cycle* (pp. 387-404). CRC Press.

- Silva, A. (1998). La materia orgánica del suelo. *Montevideo: Facultad de Agronomía*. 34p.
- Six, J., Callewaert, P., Lenders, S., De Gryze, S., Morris, S. J., Gregorich, E. G., ... & Paustian, K. (2002). Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation. *Soil science society of America journal*, 66(6), 1981-1987.
- Soane, B. D. (1990). The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. *Soil and Tillage research*, 16(1-2), 179-201.
- Sosa, M. E., Eppinger, S. D., & Rowles, C. M. (2004). The misalignment of product architecture and organizational structure in complex product development. *Management science*, 50(12), 1674-1689.
- Stolf, R. (1991). Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência de solo. *Revista brasileira de ciência do solo*, 15(3), 229-235.
- Stolf, R., Murakami, J. H., Brugnaro, C., Silva, L. G., Silva, L. C. F. D., & Margarido, L. A. C. (2014). Penetrômetro de impacto stolf-programa computacional de dados em EXCEL-VBA. *Revista brasileira de ciência do Solo*, 38, 774-782.
- Tellen, V. A., & Yerima, B. P. (2018). Effects of land use change on soil physicochemical properties in selected areas in the North West region of Cameroon. *Environmental systems research*, 7(1), 1-29.
- Toledo Bruzual, V., & Millán Boadas, Z. (2016). Construcción y calibración de un penetrómetro de impacto para medir los efectos del senderismo. *Ciencia, docencia y tecnología*, (52), 481-506.
- Torres, G., CA, M., Gutiérrez, C., CA, O. S., & EV, G. C. (2016). Manejo agronómico de los Vertisoles en México. *Terra Latinoamericana*, 34, 457-466.
- Ullé, J., Andriulo, A. E., Faggioli, V., Scianca, C., Castro, A., Rimatori, F., ... & Darder, L. (2012). Análisis e interpretación de indicadores de calidad de

- suelos en sistemas orgánicos agrícolas ganaderos. In *XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina*.
- Urricariet, S., & Lavado, R. S. (1999). Indicadores de deterioro en suelos de la Pampa Ondulada. *Ciencia del suelo*, 17(1), 37-44.
- Valdés Holguín, N. J., González Salcedo, L. O., & E Will, A. L. (2011). Estimación de la resistencia a la penetración de suelos usando redes neuronales artificiales. *Acta Agronómica*, 60(3), 252-262.
- Vásquez Polo, J. R. (2009). Caracterización de la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas en los suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena. *Maestría Ciencias Agrarias*.
- Vázquez, M. G. C. I. U. (2003). *Modificaciones estructurales y funcionales asociadas al uso forestal en el Bosque de Santa Rosa, Gto* (Doctoral dissertation, Tesis de Doctor en Ciencias. Especialidad en Biotecnología de Plantas).
- Venanzi, S., Galantini, J. A., Krüger, H., & Blanca, A. U. B. (2004, June). Pastoreo en siembra directa y crecimiento de soja. In *XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos*.
- Viglizzo, E. F., Frank, F. C., Carreño, L. V., Jobbagy, E. G., Pereyra, H., Clatt, J., ... & Ricard, M. F. (2011). Ecological and environmental footprint of 50 years of agricultural expansion in Argentina. *Global change biology*, 17(2), 959-973.
- Villarroel, J. (1988). Manual práctico para la interpretación de análisis de suelos en laboratorio.
- Villazón Gómez, J. A., Martín Gutiérrez, G., & Cobo Vidal, Y. (2017). Análisis multivariado de las propiedades químicas de los suelos pardos erosionados. *Centro Agrícola*, 44(1), 56-62.
- Volverás Mambuscay, B., & Amézquita Collazos, E. (2009). Estabilidad estructural del suelo bajo diferentes sistemas y tiempo de uso en laderas andinas de Nariño, Colombia. *Acta agronómica*, 58(1), 35-39.

- Wander, M. M., & Bollero, G. A. (1999). Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Science Society of America Journal*, 63(4), 961-971.
- Wilding, L. P., Smeck, N. E., & Hall, G. F. (1983). *Pedogenesis and soil taxonomy: the soil orders*. Elsevier.
- Wilson, M. G. (2008). *Uso de la tierra en el área de bosques nativos de Entre Ríos, Argentina* (Doctoral dissertation, Universidade Da Coruña).
- Wilson, M., & Cerana, J. (2004). Mediciones físicas en suelos con características vérticas. *Revista Científica Agropecuaria*, 8(1), 11-22.
- Xu, X., Thornton, P. E., & Post, W. M. (2013). A global analysis of soil microbial biomass carbon, nitrogen and phosphorus in terrestrial ecosystems. *Global Ecology and Biogeography*, 22(6), 737-749.