

**VARIABILIDAD ESPACIAL DE ALGUNAS PROPIEDADES FISICAS Y
QUIMICAS DE LOS SUELOS, CON DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO.**

ERIKA PAOLA ARCINIEGAS ROJAS

NASLY STELLA GOMEZ SANCHEZ

UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

ESCUELA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

VILLAVICENCIO – META

2018

**VARIABILIDAD ESPACIAL DE ALGUNAS PROPIEDADES FISICAS Y
QUIMICAS DE LOS SUELOS, CON DIFERENTES SISTEMAS DE MANEJO.**

**ERIKA PAOLA ARCINIEGAS ROJAS
NASLY STELLA GOMEZ SANCHEZ**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PRESENTADO COMO REQUISITO PARA
OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AGRÓNOMO**

**DIRECTOR:
SERGIO DAVID PARRA GONZÁLEZ
INGENIERO AGRÓNOMO M. SC.**

**UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES
ESCUELA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA
VILLAVICENCIO – META**

2018

Nota de aceptación

Director de Tesis

I.A Sergio David Parra González

Jurado

I.A. Ph.D. Amanda Silva Parra

Jurado

I.A. Luis Guarín

Villavicencio 14 de marzo de 2019

AGRADECIMIENTOS

Erika Paola Arciniegas Rojas

A Dios padre, su hijo Jesús y El Espíritu Santo quienes nos dieron la oportunidad de pensar, analizar y desarrollar este proyecto, fortaleciéndonos día tras día para que tuviéramos éxito en ello.

A mis padres los cuales con su valor, amor, entrega incondicional y guía nos apoyaron hasta el final sin importar las caídas y obstáculos que se interponían en nuestros caminos.

A los profesores Sergio David Parra, Dr. Amanda Silva y Luis Guarín, que como jurados y directores nos dieron gran parte de sus conocimientos y nos direccionaron por caminos que hicieron mas sencillo el emprendimiento y culminación de este proyecto.

A Nasly Gómez por ser parte de mi vida con su excelente amistad.

A la Universidad de los Llanos por su apoyo incondicional durante todo nuestro ciclo de estudios y proyecto de grado.

A todos los docentes que durante nuestro ciclo de estudio nos prepararon e instaron a tomar decisiones que se ven reflejadas en nuestro desempeño y culminación de nuestra carrera.

Nasly Stella Gómez Sánchez.

Primeramente, doy gracias a Dios por permitirme culminar esta meta con éxito, por guiarme cada paso que realizo.

Agradezco a mis padres que con mucho esfuerzo permitieron que culminara esta meta; por su cariño y apoyo incondicional a lo largo de esta etapa.

A mis hermanos por su cariño, comprensión y apoyo incondicional.

A Erika Arciniegas por su amistad y su apoyo incondicional a lo largo de este trayecto.

A Gerson Henao por su cariño, comprensión, y apoyo en los momentos más difíciles.

Finalmente agradezco a mi director de tesis Sergio David Parra González, por su orientación, apoyo y confianza para llevar a cabo este trabajo de investigación.

CONTENIDO

RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	9
INTRODUCCION.....	10
OBJETIVOS.....	11
JUSTIFICACION.....	12
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
MARCO TEORICO.....	14
• Aplicaciones del GPS en la agricultura.....	14
• Muestreo de suelos.....	14
• Tipos de muestreo.....	15
• Muestreo aleatorio simple.....	15
• Muestreo aleatorio estratificado.....	15
• Muestreo aleatorio sistemático.....	16
• Muestreo en conglomerado.....	17
• Geoestadística como herramienta de interpretación de datos.....	17
• Variabilidad espacial del suelo.....	18
• Análisis de semivarianza.....	19
• Semivarianza.....	19
• Semivariograma.....	20
• Métodos de interpolación.....	21
• Kriging.....	21
• Propiedades físicas del suelo.....	22
• Densidad aparente.....	22
• Método del cilindro para determinar densidad aparente.....	22
• Resistencia a la penetración.....	22
• Penetrologger con GPS.....	23
• Resistencia a la penetración medida con el penetrollogger.....	23
MATERIALES Y METODOS.....	24
• Área de estudio.....	24
• Diseño de muestreo.....	25
• Muestreo en campo.....	25
• Densidad aparente.....	25
• Resistencia a la penetración.....	26
• Fase de laboratorio.....	26

• Densidad aparente.....	26
• pH en H ₂ O.....	26
• pH en KCl.....	27
• Materia orgánica.....	27
• Fosforo disponible.....	27
• Análisis estadístico.....	27
• Análisis geoestadístico.....	27
RESULTADOS Y DISCUSION.....	28
• Variabilidad espacial: semivariogramas.....	32
• Variabilidad espacial: interpolación.....	34
CONCLUSIONES.....	37
BIBLIOGRAFIA.....	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Muestreo aleatorio simple.....	15
Figura 2. Muestreo aleatorio estratificado.....	16
Figura 3. Muestreo aleatorio sistemático.....	16
Figura 4. El semivariograma y sus componentes.....	20
Figura 5. Imagen satelital de la Granja Agrícola Unillanos.....	24
Figura 6. Imagen satelital de los lotes de sistemas agrícolas a evaluar.....	24
Figura 7. Esquema del diseño de muestreo en cuadrícula.....	25
Figura 8. Semivariograma del pH.....	33
Figura 9. Semivariograma de Densidad Aparente.....	36
Figura 10. Validación cruzada del modelo de interpolación del pH.....	34
Figura 11. Validación cruzada del modelo de interpolación de Densidad aparente.....	34
Figura 12. Mapa 2d de la densidad aparente.....	35
Figura 13. Mapa 2d de pH.....	35

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Interpretación de la resistencia a la penetración del suelo.....	23
Tabla 2. Analisis de varianza de las propiedades fisicas y quimicas evaluadas.....	29
Tabla 3. Propiedades fisicas y quimicas evaluadas en los diferentes sistemas de manejo.....	30
Tabla 4. Clasificación del fosforo disponible.....	31
Tabla 5. Parametros de los Modelos de los semivariogramas de las propiedades pH y densidad aparente.....	32

RESUMEN

La variación espacial de las propiedades del suelo es resultado de los procesos generales y específicos de la génesis de los suelos, en lotes cultivados de cítricos, guanábana y semestrales de la granja de la Universidad de los Llanos, se realizó un muestreo sistemático en cuadrícula con 24 puntos ubicados con GPS, y con base en análisis geoestadísticos se estudió la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas (densidad aparente, resistencia a la penetración) y químicas (materia orgánica, fosforo, pH en agua y pH KCl) del suelo; el estadígrafo SNK mostró diferencias significativas entre los diferentes sistemas. Y que existe variabilidad espacial en la densidad aparente y el pH del suelo.

Palabras claves: Variabilidad, propiedades físicas, propiedades químicas, geoestadístico.

ABSTRACT

The spatial variation of the properties of the soil is the result of the general and specific processes of the genesis of the soils, in cultivated lots of citrus, guanabana and half-yearly of the farm of the University of Los Llanos, systematic grid sampling was carried out with 24 points located with GPS, and based on geostatistical analysis, the spatial variability of some physical properties (apparent density, resistance to penetration) and chemical properties (organic matter, phosphorus, pH in water and pH KCl) of the soil was studied; the SNK statistician showed significant differences between the different systems. And that there is spatial variability in the apparent density and pH of the soil.

Keywords: Variability, physical properties, chemical properties, geostatistical.

INTRODUCCIÓN

Las propiedades del suelo presentan diferentes grados de variabilidad, tanto espacial como temporalmente; la variabilidad espacial es el resultado de factores como material parental, clima, organismos, topografía y tiempo, así como de procesos de formación como translocaciones, adiciones, transformaciones y remociones de materiales (Valle, 2014). Existe alta variabilidad en las propiedades que más se alteran por el manejo del suelo, y una menor variabilidad de tipo natural (Jaramillo, 2002).

Existen diferentes herramientas estadísticas que permiten estudiar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, entre los métodos más utilizados está la geoestadística, que mediante el método de interpolación kriging y utilizando los semivariogramas ajustados permite elaborar mapas. Al determinar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, se puede definir las prácticas de manejo más adecuadas, tanto para el suelo, como para el cultivo, además permite pensar en prácticas de manejo en sitio específico.

El historial del suelo tiene grandes efectos sobre la variabilidad de sus propiedades, dependiendo del manejo que se le dé, como la utilización de fertilizantes, abonos orgánicos, y la forma de aplicarlos, al igual que el laboreo que se haga en el suelo, como consecuencia se generan diferencias en la variabilidad en el contenido de nutrientes, como también producen efectos en las propiedades físicas, entre ellas la compactación (Jaramillo, 2012).

La granja de la Universidad de los Llanos tiene gran parte de su área destinada al uso agrícola, consecuentemente se realizan diferentes prácticas agronómicas, en ella no se ha realizado estudios que verifiquen la distribución espacial de las propiedades del suelo, lo cual hace imposible establecer el uso y manejo más adecuado para el suelo. Por lo anterior, se hizo necesario evaluar la variabilidad espacial de algunas de las propiedades físicas y químicas de los suelos, con el fin de mejorar las prácticas de manejo del suelo.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas y químicas de los suelos con diferentes sistemas de manejo, que permita establecer manejos de la fertilidad más acordes a las necesidades de los sistemas productivos.

OBJETIVOS

Objetivo general

- Determinar la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas y químicas en los suelos con diferentes sistemas de manejo.

Objetivos específicos

- Evaluar el efecto de diferentes coberturas en algunas propiedades físicas y químicas del suelo.
- Comparar el estado de cada uno de los suelos con respecto a las características que sean favorables ya establecidas en diferentes estudios.
- Representar mediante cartografía digital las propiedades evaluadas y estimar sus valores en posiciones no muestreadas.

JUSTIFICACIÓN

En la agricultura, la producción de alimentos inocuos y altamente alimenticios deben estar en equilibrio tanto económico como social y medioambiental, por lo cual, la intensidad en el uso del suelo es cada vez mayor, lo que provoca una degradación constante reflejada en las posteriores cosechas, incrementando los costos de producción.

Con el uso de herramientas geoestadísticas es posible determinar la variabilidad espacial, permitiendo cuantificar el valor de las propiedades físicas y químicas de un suelo, que son indispensables para conocer la capacidad productiva que este tiene, así el productor podrá diseñar un manejo adecuado manteniendo o mejorando la calidad del suelo a través del tiempo.

Una herramienta muy importante es el análisis geoestadístico, que permite visualizar la distribución espacial de diferentes variables de interés agrícola, entre ellas las propiedades físicas del suelo (densidad, porosidad, consistencia, resistencia a la penetración), que se pueden representar en mapas temáticos que permiten estimar los valores de las propiedades evaluadas en lugares no muestreados.

El conocimiento de la variabilidad espacial es una herramienta que permitirá definir un manejo más específico de nutrientes para zonas más homogéneas, logrando incrementar la productividad de los cultivos de la región de estudio.

En el siglo XXI es necesario usar diferentes técnicas que incrementen la eficiencia del uso de los limitados recursos, entre ellos el suelo, este trabajo pretende aplicar los conocimientos desde un adecuado muestreo hasta el modelamiento de la información colectada para incrementar el conocimiento de los patrones en los que cambian las propiedades de los suelos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema fundamental en los suelos de la granja Barcelona, es que se ha encontrado una alta variabilidad, principalmente de tipo horizontal debido a la aplicación de fertilizantes, herbicidas, fungicidas, y de tipo vertical por el laboreo, lo cual supone que existe una alta variabilidad de tipo espacial que debe ser comprobada para efectos más eficientes del manejo agrícola de los suelos, principalmente lo relacionado con la agricultura de precisión.

La variabilidad espacial de algunas propiedades físicas en suelos agrícolas depende directamente del uso y manejo que se le esté dando a este. Se entiende que existe menor variabilidad en suelos que no han sido intervenidos por el hombre, con respecto a suelos que han sido sometidos a algún tipo de uso.

Esta variabilidad también es medida en diferentes distancias (pequeña escala y gran escala) debido a la topografía y al tamaño de las partículas derivadas de los materiales parentales, así como al efecto de microorganismos y uso anterior del suelo, inclusive el clima y vegetación provocan dicha variabilidad, por lo tanto, se hace indispensable determinar la variabilidad espacial de las propiedades físicas de los suelos y desarrollar herramientas que nos puedan facilitar el conocimiento de dicha variabilidad como mapas geoestadísticos.

Esto conduciría a manejos agronómicos más eficientes de la fertilidad de los suelos, con el fin de elevar la productividad de los sistemas productivos de la Granja Barcelona.

MARCO TEORICO

Aplicaciones del GPS en la agricultura

El GPS es un instrumento tecnológico que permite la localización instantánea (latitud y longitud) de cualquier sector del campo o lote el cual funciona mediante la utilización de satélites, que se encuentran estratégicamente localizados y generan una serie de coordenadas con la mayor precisión posible (Best *et al.*, 2014). Esta herramienta puede ser aplicada en diversos campos relacionados con la agricultura, nos permite adquirir que luego de analizados pueden ser usados para tomar decisiones con fines de monitoreo o manejo.

El GPS y sus utilidades se han utilizado en gran parte para la planificación de los cultivos por medio de mapas topográficos y georreferenciados, para conocer características de los suelos, para direccionar tractores y maquinarias agrícolas, e inclusive para realizar mapas de rendimientos de los cuales se pueden desencadenar múltiples estrategias y mecanismos de acción en lo relacionado a la producción de alimentos (Gestracking, 2014)

El muestreo de suelos se utiliza como herramienta para obtener la georreferenciación de los diferentes puntos de los que se toman muestras, dicha georreferenciación nos ofrece una serie de datos con los cuales se pueden elaborar mapas que a su vez se pueden utilizar para determinar desde tratamientos eficientes de fertilización, hasta evidenciar los puntos específicos donde se presentan las condiciones más críticas en el terreno y así implementar estrategias de manejo integrado. También con el GPS se pueden realizar otro tipo de muestreos como la determinación de áreas con mayor incidencia de arvenses competitivos, plagas, enfermedades, deficiencias nutricionales y problemas fisiológicos que pueden afectar el rendimiento de la producción (Castellanos & Castellanos, 2012).

Muestreo de suelos

Conocer las características del suelo es de vital importancia para tomar cualquier decisión con respecto a su uso, por ello, realizar un buen análisis de suelo es una guía importante para poder diagnosticar sus condiciones, lo cual permitirá una planificación más precisa de todas y cada una de las actividades y el manejo que se le debe dar (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 2013).

El procedimiento de muestreo en los suelos depende de la variabilidad existente en este y no de la extensión en superficie unicamente, sin embargo la magnitud de la variabilidad se encuentra directamente relacionada con la extensión del terreno, por lo tanto, a mayor superficie se abarcan mas cantidades diferentes de suelo, lo que nos indica que la variabilidad va ser mayor. Para poder lograr un muestreo

adecuado se debe tener en cuenta algunos principios básicos como la variabilidad, homogeneidad, representatividad y selectividad (GERDING & SCHLATTER, 1996).

Existen diferentes tipos de muestreo, pero todos se basan en el principio de aleatoriedad (Fao, 2002).

Tipos de muestreo

Muestreo aleatorio simple

Es ideal cuando no se tiene una cantidad amplia de información sobre el suelo que se pretende evaluar, técnicamente, se basa en la teoría de las probabilidades lo que lo hace dependiente de análisis estadístico. Los puntos de muestreo se ubican en el plano cartesiano, haciendo que cada punto tenga la misma probabilidad de ser seleccionado (figura 1). Se recomienda este muestreo para áreas homogéneas menores a cinco hectáreas, que sean delimitadas por referencias visibles a lo largo y ancho del terreno (Lozano, 2006)



Figura 1. Muestreo aleatorio simple
Fuente: (McRoberts *et al.*, 1992)

Muestreo aleatorio estratificado

Este muestreo es ideal para poder subdividir en estratos o subgrupos las zonas de estudio que por su tamaño se hacen muy difíciles de evaluar con homogeneidad (figura “); Se necesita tener un conocimiento previo de la información que permita la subdivisión de la población de estudio, lo cual garantizara que los puntos de muestreo se encuentran uniformemente repartidos en toda la zona, en función de tamaño o estrato y permite conocer independientemente las características particulares de cada sustrato, por eso se recomienda en zonas de estudio superiores a diez hectáreas o en lotes que no sean homogéneos (Lozano, 2006)



Figura 2. Muestreo aleatorio estratificado
Fuente: (McRoberts *et al.*, 1992)

Muestreo aleatorio sistemático

Este procedimiento consiste en localizar puntos de muestreo a una distancia fija de un primer punto de muestreo aleatorio; por lo cual, únicamente el primer punto de muestreo es localizado aleatoriamente, y todos los demás son localizados a partir de este punto. La aplicación de este procedimiento parte de la superposición de una red o malla al área de estudio, cada unidad de malla constituye una unidad de muestreo” (Junta de Andalucía, 2015).

“Este tipo de muestreo ha sido extensamente aceptado debido a que evalúa mejor la variabilidad del suelo” (Roberts & Henry, 2000).

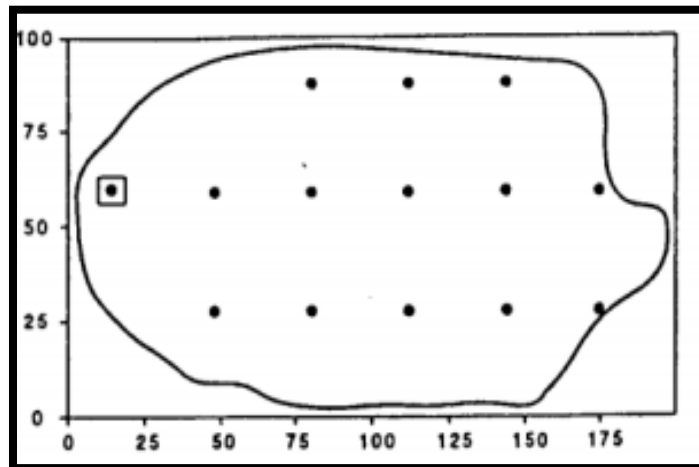


Figura 3. Muestreo aleatorio sistemático
Fuente: (Información obtenida del Portal de la Junta de Andalucía(2015))

Muestreo en conglomerado

Este método de muestreo constituye una muestra aleatoria simple en la cual cada unidad de muestreo es una colección o conglomerado de elementos; se utiliza cuando se estudian grandes extensiones y no se dispone de los recursos ni el tiempo para abarcar toda el área (Vasquez, 2009).

Geoestadística como herramienta de interpretación de datos

La utilización de métodos geoestadísticos son herramientas utilizadas con mayor frecuencia en las últimas dos décadas, esto, debido a que permiten el estudio de la variabilidad y la estructura de la variación de propiedades físicas, químicas y biológicas (Sun, *et al.*, 2003), de esta manera, conocer la variabilidad espacial de las propiedades de los suelos es fundamental para realizar manejos agronómicos y demás prácticas adecuadamente (Mulla, 2012).

La Geoestadística funciona en dos etapas, la primera es el análisis estructural, el cual describe la correlación existente entre diferentes puntos en el espacio de muestreo; la segunda fase se presenta con la predicción en sitios de la región que no se muestreó por medio de una técnica conocida como *kriging*, en el cual se calcula un promedio ponderado de las observaciones muestrales. En ello, los pesos asignados a los valores muestrales son determinados por una estructura espacial de correlación establecida en la primera etapa y por la configuración de dicho muestreo (Petitgas, 1996).

Tanto en Colombia como en otros países se han realizado bastantes estudios significativos sobre la variabilidad espacial de los suelos, algunos de estos trabajos se enfocaron en la agricultura de precisión, tal razón se debe a el intento de aumentar aún más tanto la eficiencia como la sostenibilidad de la producción (Lonoño D & Moreno, 2014).

Morantes (2014) evaluó la variabilidad espacial de suelos, esta investigación le permitió corroborar que mediante el muestreo sistemático y con la segmentación de las muestras, se puede obtener resultados confiables que permiten ajustar los requerimientos de fertilizantes para café de una forma más precisa.

En otro estudio Hernández et al. (2005), evaluaron por medio de la geoestadística el estudio de la variación espacial en la fertilidad del suelo mediante el uso de la herramienta del interpolador Kriging, siendo el objetivo principal la evaluación del impacto que puede presentarse al utilizarse sobre algunas propiedades de fertilidad de los suelos y la forma como estas se distribuyen en el espacio; ellos concluyen que “la distribución espacial de las características químicas, ligadas a la fertilidad del suelo, estuvo fuertemente ligada al manejo agronómico y que el interpolador demostró ser útil para predecir la distribución de las propiedades de fertilidad en el paisaje”.

Por otra parte, en los Llanos Orientales de Colombia, Ramirez et al. (2008), desarrollaron un estudio sobre la variabilidad espacial, el cual tenía como objetivo establecer la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración en un oxisol de los llanos orientales, y su relación con la densidad aparente, la densidad real, la porosidad total y los contenidos de arena limo y arcillas, para finalmente establecer zonas donde se pueden presentar limitantes para el desarrollo de cultivos; en sus estudios concluyeron que el uso de geoestadística permite identificar capas compactadas en el suelo, así como la localización de zonas adensadas que pueden restringir el desarrollo radical de diferentes cultivos, siendo por lo tanto una herramienta adecuada para tomar decisiones y facilitar un manejo localizado.

De la misma forma, Valvuenza et al. (2008) estudiaron la variabilidad espacial del suelo comparando su relación con el rendimiento en el cultivo de mango, de los cuales concluyeron que dichos análisis espaciales permiten conocer la distribución y la variabilidad de las propiedades del suelo y su relación con la producción.

Aunque los valores medios de algunas propiedades del suelo, para todo el lote, se pueden considerar apropiados para el cultivo del mango, el análisis espacial demostró que dentro del lote hay áreas con deficiencia de nutrientes y otras incluso, con exceso de los mismos lo cual es importante por su incidencia en el rendimiento.

Por otra parte, Hernandez et al. (2013), estudiaron la interpolación de variables de fertilidad de los suelos mediante la utilización del análisis kriging y su validación, arrojando como resultado que los mapas interpolados a escala regional sean una herramienta útil para poder predecir las propiedades de fertilidad de suelos, pese a ello, es importante un proceso de verificación para confirmar estas aproximaciones.

En otro estudio se evaluó la variabilidad espacial de las propiedades físicas de un suelo *Fluventic Ustropepts* en la cuenca baja del río las Ceibas – Huila, en este estudio se concluye que el análisis geoestadístico permitió conocer la variación de las propiedades físicas del suelo, siendo la infiltración, la variable con mayor heterogeneidad con un coeficiente de variación de 54,5%, mientras que la porosidad total y la capacidad de campo son variables normamente heterogéneas (Vargas, et al., 2015).

Variabilidad espacial del suelo

Las variaciones espaciales se estudian a través de técnicas geoestadísticas que puedan permitir la elaboración de mapas de referencia y por medio de ello delimitar áreas de manejo que permitan homogeneizar la producción. Se han ahondado en estudios que permiten conocer la variabilidad de las propiedades físicas, químicas y biológicas que están estrechamente relacionadas con el desarrollo de los cultivos, que a su vez juegan un papel muy importante a la hora de asociarse estas con el

rendimiento de los cultivos dependiendo del rango de variación del parámetro y del rango en que este afecta al rendimiento (Ortega & Flores, 1999).

“La variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo dentro de los campos agrícolas es inherente a la naturaleza geológica de la formación de suelo, pero en algunos casos la variabilidad puede ser inducida por la labranza y otras prácticas de manejo; estos factores interactúan unos con otros a través de escalas espaciales y temporales, y se modifican una vez más a nivel local por procesos de erosión y deposición” (Iqbal, *et al.*, 2005, citado por Villacorta, 2014).

Análisis de semivarianza

Mediante técnicas de Geoestadística se puede estudiar la dependencia espacial en las propiedades de los suelos, siendo una de las herramientas más utilizadas y básicas el análisis de semivarianza y el producto fundamental de dicho análisis es el semivariograma (Jaramillo, 2012).

Semivarianza

Se entiende como semivarianza a la medida del grado de similitud que puede existir entre dos observaciones situadas a una distancia determinada; la similitud entre las observaciones hace que sea mayor o menor la varianza, es decir, si hay mayor similitud entre las observaciones menor será la varianza, igualmente en sentido contrario. La semivarianza no es más que la varianza de las diferencias entre pares de puntos separados por una distancia dada (Ovalles, 1991).

La función semivarianza se expresa en la siguiente ecuación:

$$Y(h) = \frac{\sum(Z(x+h) - Z(x))^2}{2n}$$

Dónde:

$Y(h)$: Semivarianza.

N : Numero de pares de valores Z .

$Z(x)$: valor de la propiedad Z en el lugar x .

$Z(x+h)$: Valor de la propiedad Z a una distancia h del lugar x .

Semivariograma

El semivariograma se expresa a través de una gráfica en la cual se relaciona los valores promedios de la semivarianza con el espaciamiento entre las muestras que se toman para el estudio. Cuando hay dependencia espacial en alguna propiedad, la semivarianza aumenta, a medida que aumentan las distancias entre muestras hasta que logre estabilizarse la semivarianza a una distancia determinada, en donde se tiene un Semivariograma limitado. Contario cuando la semivarianza aumenta de forma monótona con la distancia y no llega a estabilizarse dentro del rango de distancias utilizadas para el muestreo, se entiende entonces que el semivariograma es no transicional. (Webster & Oliver, 2007).

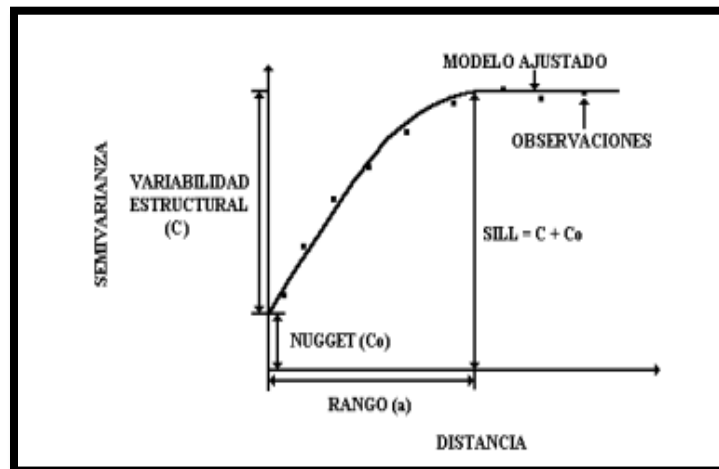


Figura 4. El semivariograma y sus componentes

Fuente: (Jaramillo, 2012)

En los semivariogramas limitados se definen algunos parámetros que caracterizan la dependencia espacial de la variable que se estudia (Jaramillo, 2012):

Nugget, efecto pepita o variabilidad aleatoria (C_0): es la semivarianza que es independiente de la distancia de muestreo; cuando es muy alto, la propiedad evaluada tiene efectos dominantes de procesos de corto rango. Es imposible encontrar variables cuya variabilidad es completamente aleatoria (pepita pura); en estos casos el modelo que se ajusta es una línea recta horizontal y el sill es igual al nugget para todas las distancias.

Variabilidad estructural (C): es la variabilidad espacial de la variable; es la diferencia entre el sill y el nugget.

Sill, umbral o meseta ($C_0 + C$): es el valor máximo que toma la semivarianza y es igual a la suma del nugget más la variabilidad estructural. El sill es el valor de la semivarianza que se torna constante a partir de una determinada distancia, a partir de la cual hay independencia espacial. Cuando el sill no se estabiliza, es decir, no

se vuelve constante a ninguna distancia de las utilizadas en el muestreo, se dice que no pudo resolver el problema de la variabilidad espacial de la propiedad en la zona de muestreo y el modelo más simple que se ajusta los datos es lineal.

Rango o alcance (a): es la distancia a la cual se estabiliza la semivarianza, es decir, se obtiene el sill. Este parámetro define la distancia hasta la cual hay dependencia espacial entre las muestras, es decir, aquellas tomadas a una distancia menor al rango, están relacionada espacialmente y las que se tomen a una distancia mayor al rango son espacialmente independientes.

Métodos de interpolación

Nielsen *et al.* (1993), Involucran procesos geoestadísticos de interpolación conocidos con los nombres de Kriging o interpolación simple y Cokriging o interpolación compuesta; con la información derivada de los semivariogramas ajustados (amplitud, umbral, varianza aleatoria), se pueden estimar valores en los sitios no muestreados utilizando el proceso de interpolación conocido como kriging puntual, generándose diagramas de las estimaciones y errores asociados a la estimación.

Kriging

La técnica del Kriging permite hacer interpolaciones óptimas y no sesgadas de las variables regionalizadas en sitios no muestreados. Utiliza para ello las propiedades estructurales de un semivariograma y un conglomerado de datos iniciales; la principal ventaja de este método de interpolación es que a cada valor interpolado se le calcula el error con que ha sido estimado, dando una medida de precisión con que se hace la interpolación, este error también se puede cartografiar, estableciéndose en lugares donde son más y cuales menos fiables las estimaciones hechas (Webster & Oliver, 2007).

El método Kriging se fundamenta en lo siguiente:

$$Z(x) = m(x) + E'(x) + E''$$

Donde $Z(x)$ corresponde a la variación espacial encontrada, $m(x)$ es el componente estructural o función determinística, $E'(x)$ es la variable regionalizada o semivarianza y E'' es el error no correlacionado espacialmente. Es importante recalcar que el análisis de interpolación se basa en la teoría de las variables regionalizadas y autocorrelacionadas en el espacio; esta autorrelación se determina a partir de la elaboración de semivariograma con los cuales se logra definir el modelo de mejor ajuste para proceder luego a la interpolación y en el cual se define la distancia máxima o "rango" en donde finaliza la autorrelación (Demmers, 1999, citado por Henríquez *et al.*, 2005).

Propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas del suelo determinan la capacidad de usos para los cuales éstos son adecuados ya sea para agricultura, ganadería, entre otros; en el campo de la agricultura esto permitirá determinar la facilidad de penetración de las raíces, aireación, capacidad de drenaje, almacenamiento de agua, y la retención de nutrientes que tiene un suelo (Rucks *et al.*, 2004).

Densidad aparente

La densidad aparente de los suelos se calcula teniendo en cuenta el espacio poroso, al cuantificar el volumen de la muestra de suelo, lo que la hace dependiente de la organización que presente la fracción sólida de dicha muestra y es estrechamente afectada por la textura de este, su estructura, porcentaje de materia orgánica, humedad y el grado de compactación (Jaramillo, 2002).

La densidad aparente afecta el crecimiento de las plantas, ya que al aumentar este, la resistencia mecánica también aumentara y la porosidad del suelo disminuirá, lo cual limita el crecimiento de las raíces; esto varía según los valores críticos que presente la textura del suelo y de la variedad establecida (Rubio, 2010).

Método del cilindro metálico para determinar Densidad aparente

Este método consiste en tomar una muestra de suelo sin perturbar, colocando un cilindro metálico con un volumen conocido en el área a muestrear, con la ayuda de un mazo se introduce, el cual se coloca en la parte superior del cilindro, se golpea hasta introducir los cilindros en el suelo, posteriormente se retira el cilindro, con ayuda de una navaja se realiza un corte a la muestra que sobresale del cilindro. En el laboratorio se extrae la muestra del cilindro, esta muestra se deja en la estufa a 105°C durante 24 horas, pasado este tiempo se retira, y se pesa; luego se determina la densidad aparente con el volumen conocido y el peso seco obtenido (Rubio, 2010).

Resistencia a la Penetración (RP)

Es un indicador de calidad del suelo, que resulta como producto de los efectos de algunas propiedades como la densidad aparente y el contenido de humedad, considerada de gran importancia sobre la compactación del suelo y su relación con el enraizamiento óptimo de las plantas, esta propiedad se ha usado como una herramienta de determinación inicial sobre la condición física del suelo (Raper & Kirby, 2006); el valor crítico de resistencia mecánica a la penetración está estipulado

entre 0.9 y 3 MPa, el cual impide la óptima elongación radical de los cultivos, por lo cual afecta el desarrollo de los mismos (Toboada & Alvarez, 2008).

La forma de determinar esta propiedad es en campo y sobre un suelo sin disturbar, con unos implementos llamados penetrómetros, los cuales miden la fuerza que se debe hacer sobre el instrumento para introducir su punta en el suelo hasta una determinada profundidad (Jaramillo, 2002).

Penetrologger con GPS

Este instrumento es muy versátil para realizar mediciones insitu, muy útil para el uso en la Ingeniería Civil, Ciencias del Suelo, agricultura, mantenimiento de campos deportivos y parques y jardines Públicos. Con el Penetrologger se pueden hacer mediciones de cada una de las capas del perfil del suelo, hasta una profundidad de 80 cm; además es capaz de almacenar y procesar las mediciones de 1.000 penetraciones (MASER, 2015).

Este instrumento se puede definir como una herramienta compuesta por un sensor de fuerza, una memoria electrónica, una barra de sondeo, un cono, un sistema de medida de profundidad, un puerto de comunicación, entrada para sensor de humedad del suelo (Thetaprobe - Delta T), externo y una antena GPS, con el cual al ejercer igual fuerza sobre las empuñaduras (eléctricamente aisladas), se puede introducir el cono de forma verticalmente en el suelo y tener las diferentes lecturas de este (MASER, 2015).

Tabla 1. Interpretación de la resistencia a la penetración del suelo (Tomada de SSDS, 1993).

CLASE DE RESISTENCIA	RESISTENCIA A LA PENETRACION (MPa)
Baja	< 0.1
Media	0.1 -2
Alta	2 – 8
Muy Alta	> 8

Resistencia a la penetración medida con el penetrolgger

La resistencia a la penetración se ve afectada por la velocidad de la penetración con la cual se hace la medición, esta es controlada electrónicamente por el aparato, el cual también nos indica el tipo y ángulo del cono usado. La resistencia que se experimenta durante el proceso de penetración se conserva en la memoria del datalogger. También es posible mostrar los resultados, inmediatamente, en la pantalla LCD, en una gráfica o en una tabla numérica de medidas” (MASER, 2015).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El trabajo se realizó en la granja de la Universidad de los Llanos, Vereda Barcelona, localizada en el kilómetro 12 vía Villavicencio – Puerto López, departamento Meta (Colombia); a una altitud de 467 m.s.n.m, temperaturas promedio de 28,9 °C, precipitaciones anuales de 4008 mm, y una humedad relativa promedio anual de 76%. Los Lotes evaluados están establecidos con diferentes sistemas de manejo, como Ciclos Semestrales, Cítricos, y cultivo de Guanábana (*Annona muricata*), cada lote consta de 1 hectárea.

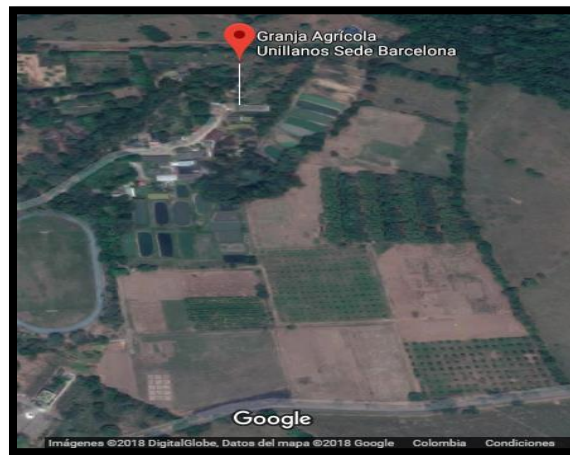


Figura 5. Imagen satelital de la Granja Agrícola - Unillanos
Fuente: (Google maps, 2018)



Figura 6. Imagen satelital de los lotes de sistemas agrícolas a evaluar
Fuente: (Google Earth Pro, 2018)

Diseño de muestreo

Se realizó un muestreo sistemático en cuadrícula con 24 puntos, ubicando cada punto de muestreo con un GPS; en cada punto se tomó una profundidad, de 0 - 20 cm tal como se muestra en la figura 7.

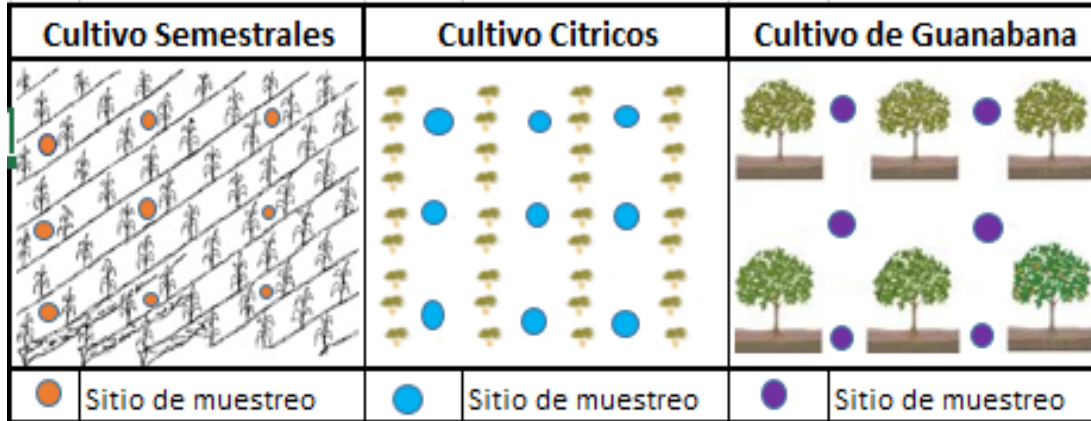


Figura 7. Esquema del diseño de muestreo en cuadrícula.

Fuente: Elaboración propia.

Muestreo en campo

En cada punto de la cuadrícula, se tomaron submuestras de suelo disturbado, con la ayuda del barreno tipo holandés; y otra muestra de suelo no disturbado (anillos de acero). Las muestras de suelo se utilizaron para determinar la densidad, pH agua, pH KCl, fósforo disponible, y materia orgánica.

Este muestreo se realizó en un día específico donde las condiciones climáticas fueran similares para que no hubiera algún tipo de alteración de las muestras con respecto a cada sitio de muestreo.

Densidad aparente (Da)

Una vez en campo, se retiró la cobertura vegetal del suelo, y se introdujo el cilindro, con ayuda de un mazo se golpeó hasta que el borde superior del cilindro llegó a ras del suelo; con un palín se extrajo el cilindro, y con un cuchillo se retiró la parte excedente de suelo del cilindro, posteriormente la muestra se depositó en una bolsa de ziploc, se etiquetó, y se llevó al laboratorio para su respectivo análisis.

Resistencia a la penetración

Esta se determinó con el penetrológico con GPS el cual se manipuló de la siguiente forma:

Primero se seleccionó el terreno, se limpió un poco de cualquier objeto que pueda interferir superficialmente, se armó la barra de sondeo con el respectivo cono, se introdujo la barra de sondeo al aparato por la parte inferior de este, se encendió el aparato y se dispone en funcionamiento. Para realizar las pruebas, se tomó de las manijas laterales del aparato, muy firmemente y con cuidado se introdujo la barra de sondeo, esto se debe hacer con una fuerza y velocidad constante la cual se indica en la pantalla del aparato, en esta se muestra cuanta fuerza se está aplicando, si se excede se indica por medio de unas barras el grado de fuerza en exceso acompañado de un sistema de alarma de sonido, igualmente cuando no se realiza con la fuerza adecuada se dispara la alarma y se muestran las barras en la pantalla. Para que las muestras sean verídicas se debe aplicar una fuerza que no sobrepase el punto medio del medidor. Los resultados se van guardando en el dispositivo; se hizo de igual forma en cada uno de los puntos a muestrear.

Fase de laboratorio

Las características físicas y químicas del suelo evaluadas fueron determinadas según los métodos y técnicas empleadas en el laboratorio de análisis de suelos de la universidad de los llanos (IGAC, 2006).

Densidad aparente (Da)

En el laboratorio, se procedió a pesar las muestras (cilindro + la muestra de suelo, y solo la muestra); estas muestras fueron llevadas al horno a una temperatura de 105°C por 24 horas, transcurrido este tiempo, se pesaron las muestras. Teniendo todos los datos se procedió a hacer los cálculos para hallar la densidad aparente.

pH en H₂O

Se pesó 20 gr de suelo seco tamizado (tamiz # 2mm), luego se puso en un vaso de precipitado de 100 mL con 20 mL agua destilada, se agito con una varilla de vidrio hasta formar una suspensión homogénea, formado esto, la muestra se dejó en reposo durante 30 min. Pasado este tiempo se midió el pH de la muestra en el potenciómetro, se agitó con una varilla de vidrio hasta formar una suspensión, así mismo se introdujo de inmediato el electrodo, y se procedió a leer el valor del pH.

pH en KCl

Se pesó 20 gr de suelo seco tamizado (tamiz # 2mm), luego se colocó en un vaso de precipitado de 100 mL, se agregó 20 mL de la solución de KCl 1N, se agito con una varilla de vidrio hasta formar una suspensión homogénea, formado esta suspensión se dejó en reposo durante 20 minutos. Pasado este tiempo se midió el pH en el potenciómetro, agitando vigorosamente con la varilla de vidrio la muestra hasta formar una suspensión, se introdujo de inmediato el electrodo y se procedió a leer el pH.

Materia orgánica

Pesar 0.5 gr de suelo tamizado y colocarlo en un matraz Erlenmeyer de 500 ml, se añade 10 ml de dicromato de potasio 1N, se agita cuidadosamente para que entre en contacto con todo el suelo. Agregar cuidadosamente con una bureta 20 ml de H²SO⁴ concentrado, agitar cuidadosamente durante 1 minuto, y dejar reposar durante 30 minutos.

Añadir 200 ml de agua destilada, agitar y dejar enfriar; luego añadir 5 ml de H³PO⁴ concentrado, y adicionar de 5 a 10 gotas del indicador de difenilamina. Titular con la solución de sulfato ferroso gota a gota hasta un punto final verde claro.

Fosforo disponible

Se pesó 2.85 gr de suelo seco tamizado (tamiz # 2 mm), se colocó en un frasco de 50 mL, y se colocaron los frascos en el agitador recíproco, se agregó 20 mL de solución de extractora Bray II, se agito durante 40 segundos. Se filtró de inmediato por gravedad en vaso de precipitado de 50 mL, la cuantificación se realizó usando un espectrofotómetro uv-bis.

Análisis estadístico

Inicialmente se realizó un análisis de varianza y posteriormente prueba de SNK para determinar las diferencias estadísticas de las propiedades evaluadas en función del uso que tiene el suelo, este se realizó usando el programa Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2014).

Análisis geoestadístico

Los datos de los análisis geoestadísticos se corrieron en el programa GS+ (Versión 9.0), este programa permite la definición de semivariogramas y sus respectivos sets de parámetros (nugget, Co, Sill Co + C, range Ao).

Posteriormente se realizó la interpolación mediante el método Kriging, esta interpolación es la base para generar mapas que permiten visualizar la variabilidad espacial de las propiedades.

Finalmente después de obtener la cartografía digital se procedió a regresar a campo, para seleccionar sitios no muestreados y de esta forma comparar los valores arrojados por el método de interpolación usado y el valor real, con esta información se realizó una correlación que sirvió como una comprobación del modelo geoestadístico.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La tabla 2, muestra los resultados de análisis de varianza del *p-valor* y coeficiente de variación, el *p-valor* para las propiedades físicas y químicas evaluadas en los diferentes sistemas, el *p-valor* fue < 0.0001 , lo que indica que existen diferencias estadísticas significativas.

Tabla 2. Analisis de varianza de las propiedades físicas y químicas evaluadas.

Lote	Variable	P-valor	Coefficiente de variación (%)
Guanábana, cítricos y Semestrales	pH en agua	$< 0,0001$	5,48
	pH en KCl	$< 0,0001$	4,88
	Fosforo	$< 0,0001$	55,19
	Materia Orgánica	$< 0,0001$	30,69
	Densidad Aparente	$< 0,0001$	8,73
	Resistencia a la penetración	$<0,0001$	19,89

P-valor corresponde a grado de significancia estdgrafo F.

El pH en KCl presentó la menor variabilidad (4.88%), seguido de pH en agua (5.48%), estos resultados se deben a que el pH es medido con un equipo (potenciometro), lo que hace que la medida sea muy estable, además el KCl es una solución que hace que las lecturas de pH sean más estables; igualmente la densidad aparente (8.73%) presentó baja variabilidad, es decir estas propiedades presentaron un coeficiente de variación menor al 12%.

A diferencia de estas propiedades, la materia orgánica y fósforo tiene una media a alta variabilidad, esto se puede deber al manejo que se le da al suelo, como la incorporación de residuos orgánicos y la aplicación de fertilizantes (Acevedo *et al.*, 2007); el fósforo presentó una variación media (55.19%), tanto como la materia orgánica (30.69%) y resistencia a la penetración (19.89%), debido a que los resultados de coeficiente de variación de estas propiedades se encuentran entre 12-60%. Estos resultados se determinaron según la clasificación de Coeficiente de Variación de las propiedades del suelo planteados por Warrick & Nielsen (1980) citado por Xavier & Déleg (2018).

Los coeficientes de variación bajos y medios encontrados en las propiedades evaluadas puede ser a los diferentes componentes de formación del suelo, ya que estarían siendo afectadas por características que inciden los procesos de evolución

del suelo, obteniendo así resultados diferentes, y aun así utilizando escalas de muestreo similares como los resultados obtenidos por Obando et al. (2006), citado por Xavier & Déleg (2018).

Según Zhao et al. (2007), citado por Monroy et al. (2017) la variación de la resistencia a la penetración se ve afectada por el contenido de humedad del suelo, como consecuencia presentan coeficientes de variación diferentes, esto dependiendo del lugar y el contenido de humedad donde se realicen las evaluaciones.

Tabla 3. Propiedades físicas y químicas evaluadas en los diferentes sistemas de manejo.

Lote	pH agua	pH KCl	Fosforo	Materia Orgánica	Densidad Aparente	Resistencia a la penetración
Semestrales	4.08 A	3.59 A	35.35 B	3.77 B	1.35 B	1.49 A
Cítricos	4.10 A	3.92 B	8.75 A	1.77 A	1.26 A	1.87 B
Guanábana	5.44 B	4.30 C	35.71 B	7.45 C	1.55 C	1.76 B

Letras iguales en las columnas no difieren estadísticamente por la prueba SNK ($p < 0.05$).

La tabla 3, muestran variaciones estadísticas de las propiedades químicas y físicas evaluadas, en la propiedad química pH realizada en agua, presentó diferencia significativa el sistema de guanabana con un pH 5.44, mayor que el de los sistemas semestrales y cítricos, los cuales presentaron similitud en el resultado de la prueba.

En el pH realizado en KCl, se presentó diferencias significativas, en los tres sistemas, siendo el sistema de guanabana (4.30) el pH mayor, seguido de los cítricos (3.92), y el pH menor es el sistema de semestrales (3.59). Al obtener un pH inferior a 7.0 significa que es un suelo con pH ácido; los suelos ácidos presentan problemas de retención de macronutrientes como el calcio, magnesio y fósforo, mientras que con los micronutrientes sucede lo contrario a excepción del molibdeno, estos son mejor absorbidos en este tipo de suelos (AGROPAL, 2015).

El pH del suelo influye en la disponibilidad de los nutrientes, el cual puede ser la causa de que la planta presente deficiencia, toxicidad o que los elementos no se encuentren en niveles adecuados (AGROPAL, 2015) afectando así el crecimiento del cultivo. Con un pH ácido en el suelo se limita la nitrificación y la descomposición de la materia orgánica (INTRIGA, 2018).

Según Pellegrini et al (2016) el pH medido con KCl tiende a ser menor al pH medido en agua en un orden de 0.5 a 1.0 unidades, siendo menor la diferencia a medida

que el pH sea mayor. Un fenómeno muy importante ocurre en el pH medido en KCl dado por la concentración de potasio en la solución, en este método ocurre un proceso de reemplazamiento de los hidrogeniones del complejo de cambio, lo que a su vez provoca un incremento de la concentración de hidrogeniones que da como resultado un pH bajo (Universidad de Extremadura, 2005).

El resultado del contenido de fósforo en cada uno de los sistemas está directamente relacionado con los requerimientos nutricionales de cada cultivo y su plan de fertilización, cuanto mayor sea el requerimiento del cultivo, los contenidos de fósforo en el suelo tienden a disminuir, por consiguiente las diferencias encontradas en la tabla 3 se pueden deber a la aplicación de fertilizantes en los lotes evaluados.

De acuerdo a la clasificación de Quintana et al (1983) (tabla 4) el contenido de fósforo es bajo para el cultivo de cítricos (8.75 ppm), la disponibilidad de fósforo se reduce debido a que forma compuestos insolubles con el hierro y aluminio, dejando así de estar disponible para las plantas (Havlin *et al.*, 2014; citado por Cenicafe, 2016); en cuanto al cultivo de guanabana (35.71 ppm) y semestrales (35.35 ppm) tienen un contenido de fósforo alto, no hubo diferencias significativas entre estos dos últimos cultivos. Si el pH es inferior a 5.5 la absorción de fósforo se reducirá, lo que puede conducir a la aparición de síntomas carenciales, como consecuencia de un pH inadecuado, las raíces de los cultivos pueden resultar severamente deterioradas antes de que el cultivo muestre síntomas carenciales, y así mismo la calidad y la cantidad de las cosechas pueden verse afectadas (TRAXCO, 2013).

Tabla 4. Clasificación del fósforo disponible.

Rango (ppm)	Clasificación
< 10	Bajo
10 - 20	Medio
> 20	Alto

Fuente: Quintana et al., (1993), citado por Castillo (2005).

Para el caso de la materia orgánica el sistema con mayor contenido de materia orgánica fue el de la guanabana (7.45 %), seguido de los semestrales (3.77 %) y los cítricos (1.77 %), se presentaron diferencias significativas en los tres sistemas. Los resultados obtenidos en esta variable están relacionados con la cantidad de hojarasca producida para el caso de los cítricos y guanabana, y de los residuos que quedan después de la cosecha para el caso de los semestrales.

Aquellos suelos que tienen baja materia orgánica, inferiores a 2.0% se debe a que presentan algún grado de degradación, por lo tanto requiere procesos de recuperación (García *et al.*, 2018).

En cuanto a la densidad aparente presentó diferencias significativas en los tres sistemas, la densidad fue mayor en el sistema de guanabana (1.55 g/cm³), seguido de los semestrales (1.35 g/cm³) y citricos (1.26 g/cm³). En estudios realizados por Rodríguez et al. (2000) citado por García et al. (2018) encontraron que la densidad aparente tiende a disminuir a medida que aumenta el contenido de materia orgánica, la densidad aparente disminuye en suelos donde se realiza labranza con cincel.

El sistema productivo de los citricos presentó una mayor resistencia a la penetración (1.87), no tuvo diferencia significativa con el sistema de guanabana (1.76), siendo el sistema de semestrales con menor resistencia a la penetración (1.49); este resultado puede estar relacionado con las labores de preparación del suelo, al someter el suelo al laboreo estas rompen las estructuras compactadas del suelo, disminuyendo así la resistencia a la penetración y densidad aparente (Rahman *et al.*, 2008; citado por Mogollón, 2012). Cabe resaltar que los suelos arcillosos tienden a compactarse de manera natural principalmente en las épocas de sequía o en terrenos donde no sea posible proporcionar una lámina de agua constante.

Para el caso de los citricos, la compactación se da por el uso frecuente de maquinaria, por el trayecto de los trabajadores, exposición directa del suelo a la lluvia y la pérdida de suelo por escorrentía al realizar prácticas tradicionales como eliminación de la cobertura vegetal, causando así cambios en las propiedades físicas del suelo, aumentando así la resistencia a la penetración (Pettersson, 1977; citado por Orduz *et al.*, 2011). Todo esto como consecuencia al mal manejo que se le da al suelo, influyen en la producción final del cultivo, afectando así la economía de los productores a mediano y corto plazo (Orduz *et al.*, 2011).

Variabilidad espacial: semivariogramas

Tabla 5. Parámetros de los Modelos de los semivariogramas de las propiedades pH y densidad aparente.

Propiedades	Modelo	Parámetros estimados		GDE (%)	Amplitud (A ₀)	R ²
		Nugget (C ₀)	Sill (C ₀ +C)			
pH	Gaussiano	0,0675	0,365	81,5	91,82	0,263
Densidad aparente	Gaussiano	0,00384	0,01328	71,0	43,87	0,495

GDE: Grado de dependencia espacial.

La tabla 5, muestra los resultados de los modelos geostatísticos, de acuerdo con estos resultados, densidad aparente y pH se ajustan mejor al modelo *Gaussiano*. Según estudios realizados por Santra et al., (2008), citado por Fernández (2014) sobre propiedades físicas, el modelo de semivariograma que se ajusta mejor es el modelo *Gaussiano* para variables como la densidad aparente.

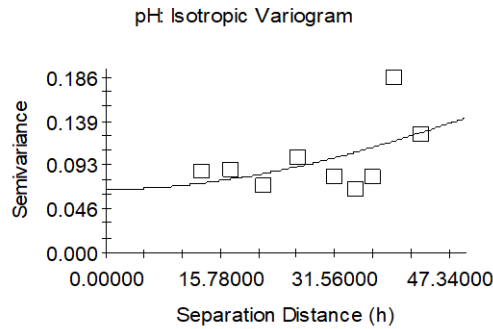
Según los criterios desarrollados por Cambardella et al. (1994), la dependencia espacial es fuerte cuando el semivariograma tiene un efecto nugget inferior al 25% de la semivarianza, moderada dependencial espacial si se encuentra entre 25-75%, y debil dependencia espacial si es mayor a 75%. De acuerdo a esto, se determinó dependencia espacial moderada para densidad aparente (71.0%), y para pH una debil dependencia espacial (81.5%). Una dependencia espacial de moderada a fuerte en las propiedades del suelo se debe a diferentes factores como el clima, relieve, material parental, organismos y tiempo; mientras que una dependencia espacial debil puede ser por la preparación del suelo, encalado, fertilización, entre otros (Cambardella et al., 1994; Yasrebi et al., 2008; citado por Fernández, 2014).

En las figuras 8 y 9 se representan los semivariogramas de pH y Da; horizontalmente se representa la distancia de separación en metros que es igual a la amplitud y la semivarianza de forma vertical. La distancia de separación hace relación a lo que representa la dependencia espacial, es decir, cada cierta distancia en donde la propiedad tiene una relativa similitud sin afectaciones o variabilidades significativas.

Luego de pasar de dicha distancia empieza a ser afectada por el siguiente punto o distancia; este punto se obtiene cuando la semivarianza se estabiliza en el modelo, como se puede observar en la figura 8 (Semivariograma del pH), cada 91.82 metros está la dependencia espacial donde se tiene que tomar un punto para poder determinar bien las propiedades del suelo. Igualmente sucede con la densidad aparente (figura 9), cada 47.87 metros existe dependencia espacial. En estudios realizados por Xavier & Déleg (2018) las propiedades del suelo presentaron rangos superiores a 20 metros, confirmando así que la distancia utilizada en el muestreo entre puntos existe dependencia espacial.

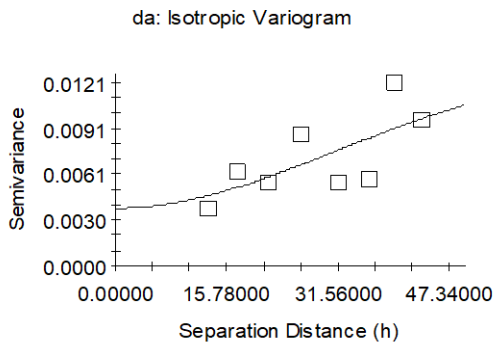
Cuando el efecto nugget o efecto pepita se encuentran puntos dispersos alejados de la línea de representación, esto puede significar un posible error de muestreo o manipulación de las muestras en laboratorio, cuanto mayor sea la distancia de los puntos con respecto a la línea de representación es mayor la cantidad de error.

En el modelo usado para la interpolación fue un modelo isotrópico, es decir la variación estuvo dada básicamente por la distancia de las muestras (Nielsen & Wendroth, 2003, citado por Valle et al., 2014), que a medida que la distancia aumenta, también lo hace la semivarianza.



Gaussian model ($C_0 = 0.06750$; $C_0 + C = 0.36500$; $A_0 = 91.82000$; $r^2 = 0.263$;
 RSS = $8.085E-03$)

Figura 8. Semivariograma del pH.

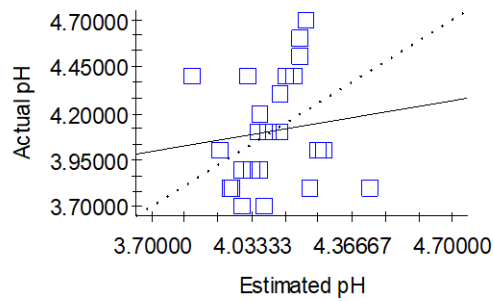


Gaussian model ($C_0 = 0.00384$; $C_0 + C = 0.01328$; $A_0 = 43.87000$; $r^2 = 0.495$;
 RSS = $2.624E-05$)

Figura 9. Semivariograma de Densidad Aparente.

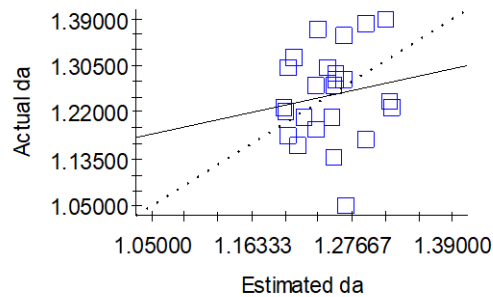
Variabilidad espacial: interpolación

En las figuras 10 y 11 se observa la validación cruzada de los modelos de interpolación para las propiedades densidad aparente y pH, se evidencia un comportamiento disperso de distintos puntos con valores extremos, en las graficas se observa que los valores teoricos (obtenidos por el modelo matemático) y los valores reales (valores medios en campo) varian, es decir, que al tener valores muy altos o extremos, el modelo arroja valores bajos, y cuando los valores son muy bajos el modelo tiende a sobre estimarlos.



Regression coefficient = 0.270 (SE = 0.481 , r2 =0.014,
y intercept = 2.99551, SE Prediction = 0.293)

Figura 10. Validación cruzada del modelo de interpolación del pH.



Regression coefficient = 0.355 (SE = 0.468 , r2 =0.025,
y intercept = 0.80790, SE Prediction = 0.082)

Figura 11. Validación cruzada del modelo de interpolación de Densidad aparente.

Las figuras 12 y 13 son una representación en 2d de la Densidad Aparente (Da) y el pH, las leyendas al costado derecho son los valores o rangos de valores para cada franja de color representada en el mapa, de acuerdo con esto para la figura 9 que corresponde a Da, se puede evidenciar un comportamiento variable en cuanto a los valores altos medios y bajos. Los valores altos van representados por colores desde las gamas de amarillos, rojos y blanco, mientras que los valores bajos son representados por las gamas verdes y azules. De acuerdo con esto, la Da empieza a aumentar al costado izquierdo de la parte inferior de coloraciones verdes, siguiendo su crecimiento hacia la parte superior central generando las cuervas que se observan lo que se puede entender como la variabilidad espacial de dicha propiedad con respecto a las distancias observadas en el mapa. También se puede observar que en la parte superior derecha tiene un comportamiento similar, pero con valores más bajos que los anteriores, crecientes hacia la parte superior central del mapa.

La Da en el suelo refleja su variabilidad dependiendo bastante del uso y manejo que se le ha dado anteriormente y en el presente, ya que al ser un lote utilizado para un cultivo perenne (cítricos) la dinámica de adecuaciones se vuelve nula, lo que ayuda a que se formen compactaciones y Densidades muy altas en los suelos tal como lo expresan Vargas, Serrato y Torrente (2015) en su estudio de la variabilidad espacial de las propiedades físicas de un suelo Fluventic Ustropepts en la cuenca baja del río Las Ceibas, Huila.

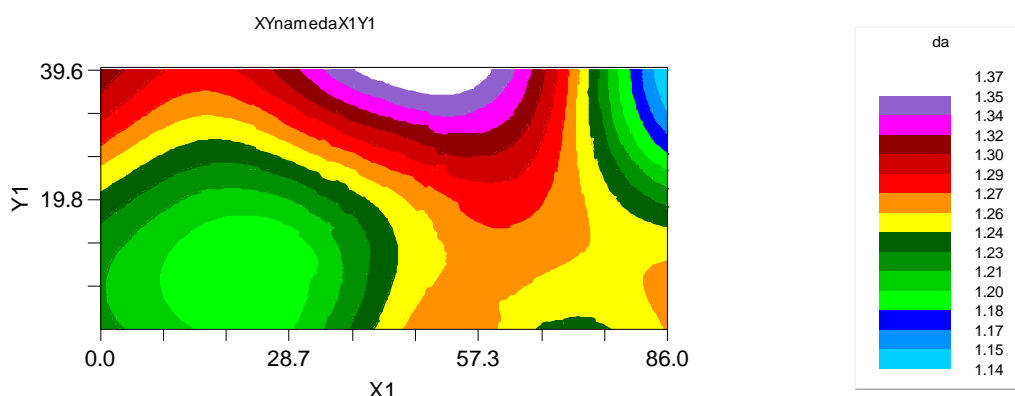


Figura 12. Mapa 2d de la densidad aparente

En la figura 13 se representa la variabilidad espacial del pH, dado que es una propiedad ligada a los cambios de las soluciones del suelo tal como se observa en el mapa, donde las distancias de variabilidad son cortas y al estar representada por franjas semi uniformes indica que los procesos de acidificación se encuentran presentes en todo el lote, indicando una baja heterogeneidad, indicando que las fertilizaciones podrían ser similares. De acuerdo con varios autores el pH es una de las variables químicas del suelo que menos varía, debido a que se mide en escala logarítmica, reduciéndose la expresión de variabilidad.

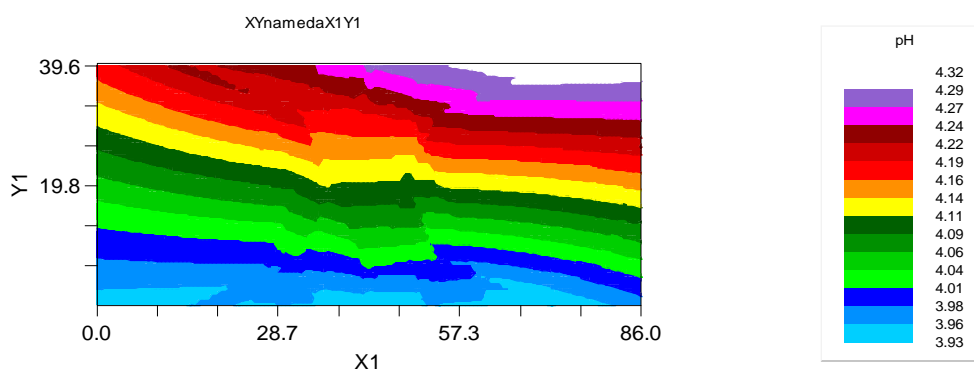


Figura 13. Mapa 2d de pH

CONCLUSIONES

- La variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas de suelos agrícolas evaluados estuvieron relacionadas con los cambios estructurales y químicos producto de las diferentes metodologías de producción utilizadas, de acuerdo con el grado de intervención agrícola en los suelos se pueden observar diferentes comportamientos como el grado de pH encontrado en los lotes los cuales en su mayoría tienden a ser ácidos, y la distribución de densidades aparentes con tendencia a ser bajas.
- La variabilidad encontrada en los contenidos de materia orgánica fue alta, y dependió en su mayoría de la cantidad de materiales depositados en el suelo, en este caso el cultivo de guanábana cumple una función muy importante al depositar mayor contenido de materiales que posteriormente ser degradaran y pasaran a ser parte de la materia orgánica existente en el suelo.
- En los suelos de estudio se presentó una alta heterogeneidad entre las diferentes propiedades estudiadas, resaltándose la diferencia entre los lotes de perennes (cítricos y guanábana) con respecto a los de uso semestral.
- Los lotes que están con cultivos semestrales presentan una alta variabilidad en sus propiedades químicas debido a los manejos desarrollados en estos (laboreos, enmiendas, fertilizaciones, incorporación de residuos de cosecha), sin embargo, la rotación realizada cada semestre que incluyen especies leguminosas, provocan un mejoramiento progresivo de las propiedades de los suelos, especialmente la densidad aparente, materia orgánica y resistencia a la penetración, también se observan mayores contenidos de fósforo y probablemente de otros minerales disponibles para la absorción de las plantas.
- El uso de la geoestadística como herramienta para el análisis de bases de datos es de gran importancia para los procesos agrícolas, por ejemplo, al aplicar estas herramientas se pudo comprobar el estado de algunas propiedades como pH y densidad aparente y con base en ello desarrollar mapas georreferenciados que muestran los puntos específicos en los cuales se presentan los valores arrojados en el estudio y con base en ello extrapolándolos a un contexto productivo se pueden desarrollar estrategias de manejo más uniformes y conservación con el fin de ir mejorando cada vez la calidad del suelo.
- Al interpretar los resultados de los muestreos en campo, al georreferenciarlos estas herramientas permiten desarrollar y ejecutar planes de manejo integrado más eficientes procurando un beneficio sostenible.

BIBLIOGRAFÍA

Acevedo, D., Alvarez, M., Hernandez, E., Maldonado, R., Perez, M., & Castro, R. (2007). *VARIABILIDAD ESPACIAL DE PROPIEDADES QUÍMICAS DEL SUELO Y SU USO EN EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS*. Recuperado el 09 de Noviembre de 2018, de [file:///C:/Users/ACER/Downloads/Vol_26-Num_4-264317%20\(7\).pdf](file:///C:/Users/ACER/Downloads/Vol_26-Num_4-264317%20(7).pdf)

AGROPAL. (2015). *El pH del suelo en la agricultura*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2018, de <http://www.agropal.com/es/el-ph-del-suelo/>

Best, S., León, L., Mendez, A., Flores, F., & Aguilera, H. (2014). *ADOPCIÓN Y DESARROLLO DE TECNOLOGÍA EN AGRICULTURA DE PRECISIÓN*.

Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de

<http://www.gisandbeers.com/RRSS/Publicaciones/Tecnologia-Agricultura-Precision.pdf>

Cambardella, C., Moorman, T., Parkin, T., Karlen, D., Novak, J., Turco, R., & Konopka, A. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5). Recuperado el

[https://www.researchgate.net/publication/43269985_Field-](https://www.researchgate.net/publication/43269985_Field-Scale_Variability_of_Soil_Properties_in_Central_Iowa_Soils)

[Scale_Variability_of_Soil_Properties_in_Central_Iowa_Soils](https://www.researchgate.net/publication/43269985_Field-Scale_Variability_of_Soil_Properties_in_Central_Iowa_Soils) de octubre de 2018

Castellanos, C., & Castellanos, J. (2012). *agricultura101.com*. Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de agricultura101.com:

<http://agricultura101.com/2012/03/aplicacion-del-gps-en-la-agricultura/>

Castillo, C. (2005). *Selección y calibración de indicadores locales y técnico para evaluar la degradación de los suelos laderas, en la microcuenca Cuscamá el Tuma - La Dalia Matagalpa*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2018, de <http://repositorio.una.edu.ni/1094/1/tnp35c352.pdf>

Cenicafe. (2016). *La acidez del suelo, una limitante común para la producción del café*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2018, de Avances Tecnicos Cenicafe: <https://www.cenicafe.org/es/publications/AVT0466.pdf>

Crespo, C. (2007). *Mecánica de Suelos y Cimentaciones* (sexta ed.). México.

Demmers, M. (1999). *Fundamentals of geographic information* (2 ed.). Wiley.

Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., Tablada, M., & Robledo, C. (2014). *Grupo Infostat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba*. Argentina.

Recuperado el 21 de Mayo de 2018, de <http://www.infostat.com.ar>

Edafología. (2018). *Consistencia*. Recuperado el 19 de Marzo de 2018, de http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/38725/mod_resource/content/1/TEMA%204%20-%20CONSISTENCIA.pdf

Fao. (2002). *fao.org web site*. Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de <http://www.fao.org/docrep/005/Y3779S/y3779s08.htm>

Fernández, J. (2014). *Parámetros productivos del caucho (Hevea brasiliensis) y su relación espacial con las propiedades físicas y químicas del suelo*. Recuperado el 3 de Noviembre de 2018, de <http://www.bdigital.unal.edu.co/46821/1/07790788.2014.pdf>

García, D., Cárdenas, J., & Silva, A. (2018). Evaluación de sistemas de labranza sobre propiedades físico-químicas y microbiológicas en un Inceptisol. *Revista de ciencias agrícolas*, 34(1). Recuperado el 12 de noviembre de 2018, de <http://www.scielo.org.co/pdf/rcia/v35n1/0120-0135-rcia-35-01-00016.pdf>

GERDING, V., & SCHLATTER, J. (1996). Muestreo de Suelos. *Muestreo de suelos para evaluar su fertilidad, con énfasis en el régimen de elementos nutritivos*. Valdivia, Chile: UACH, Instituto de Silvicultura. 6 p. Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de <http://www.uach.cl/labsuelosforestales/msuelos.htm>

Gestracking. (16 de julio de 2014). *Gestracking.com*. Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de <http://gestracking.com/ usos-de-los-gps/#>

Google Earth Pro. (2018).

Google maps. (2018). <https://www.google.com.co/maps/@3.9010304,-76.2937344,14z?hl=es-419>. Recuperado el 23 de Marzo de 2018, de <https://www.google.com.co/maps/@3.9010304,-76.2937344,14z?hl=es-419>

Google sites. (2012). *Estudio de Estabilidad Alto de Misael*. Recuperado el 19 de Marzo de 2018, de Google sites: <https://sites.google.com/site/estabilidadaltodemisael/caracterizacion-fisica/3-5>

Havlin, J., Tisdale, S., Nelson, W., & Beaton, J. (2014). *Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management* (8 ed.). New Jersey.

Henriquez, C., Killorn, R., Bertsch, F., & Sancho, F. (2005). LA GEOESTADISTICA EN EL ESTUDIO DE LA VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO MEDIANTE EL USO DEL INTERPOLADOR KRIGING. *Agronomía Costarricense*. Recuperado el 24 de Abril de 2018, de http://www.mag.go.cr/rev_agr/v29n02_073.pdf

Hernandez, C., Méndez, J., & Masis, R. (2013). INTERPOLACIÓN DE VARIABLES DE FERTILIDAD DE SUELO MEDIANTE EL ANÁLISIS KRIGING Y SU VALIDACIÓN. *Agronomía Costarricense*, 37(2). Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de <file:///C:/Users/ACER/Downloads/12763-20908-1-SM.pdf>

- IGAC. (2006). *Metodos analiticos del laboratorio de suelos* (sexta ed.). Bogota.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. (13 de Marzo de 2013). *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) web site*. Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) web site: <https://inta.gob.ar/documentos/muestreo-de-suelos-0>
- INTRIGA. (2018). *Disponibilidad de Nutrimientos y el pH del suelo*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2018, de <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/disponibilidad-de-nutrimientos-y-el-ph-del-suelo>
- Iqbal, J., Thomasson, J., Jenkins, J., Owens, P., & Whisler, F. (2005). *Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils*.
- Jaramillo, D. (2012). Variabilidad Espacial del Suelo: Bases para su estudio. *Revista de la Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellin*, 1(1). Recuperado el 24 de Abril de 2018, de [file:///C:/Users/ACER/Downloads/49004-239242-1-PB%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/ACER/Downloads/49004-239242-1-PB%20(1).pdf)
- Jaramillo, J. D. (2002). *Introduccion a la ciencia del Suelo*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 07 de Abril de 2018, de <https://core.ac.uk/download/pdf/11052520.pdf>
- Junta de Andalucía. (2015). *Junta de Andalucía site web*. Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de Junta de Andalucía site web: https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Estado_Y_Calidad_De_Los_Recursos_Naturales/Suelo/Contaminacion_pdf/Toma.pdf
- Lonoño D, & Moreno, J. (2014). *Cuantificación de la variabilidad espacial de suelos en un huerto citricola en el departamento de calda*. Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/2039/VES%20Final.pdf?sequence=1>
- Lozano, P. Z. (2006). Muestreo con fines de caracterización y evaluación de propiedades de los suelos. 14. Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de http://saber.ucv.ve/ojs/index.php/rev_venes/article/viewFile/984/913
- Martinez, L., Giraldo, R., & Valvuela, C. (2008). VARIABILIDAD ESPACIAL DEL SUELO Y SU RELACION CON EL RENDIMIENTO DE MANGO (*Mangifera indica* L.). *Bras. Frutic*, 30(4). Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de <http://www.scielo.br/pdf/rbf/v30n4/a49v30n4.pdf>
- MASER. (2015). *Penetrologger con GPS y Sonda de Humedad de Suelos*. Recuperado el 23 de 03 de 2018, de <http://www.maser.com.co/categorias/Suelos/Penetrometros/Penetrologger-con-GPS-y-Sonda-de-Humedad-de-Suelos>

McRoberts, R., Tomppo, E., & Czaplewski, R. (1992). *Diseños de muestreos de las evaluaciones forestales nacionales*. Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de Fao:

http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/national_forest_assessment/images/PDFs/Spanish/KR2_ES__4_.pdf

Melendez, G. (2012). *Evaluación de las propiedades físicas de un suelo cultivado con caña de azúcar (Saccharum officinarum) bajo la aplicación de biosólidos*.

Recuperado el 17 de Marzo de 2018, de

<http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7820/1/CB-0461297.pdf>

Mogollón, M. (2012). *Comportamiento espacial de la resistencia mecánica a la penetración y su relación con propiedades físicas del suelo en áreas con diferentes usos y ocupaciones en la Sabana de Bogotá*.

Recuperado el 12 de noviembre de 2018, de Universidad Nacional de Colombia:

<http://bdigital.unal.edu.co/7006/1/822104.2012.pdf>

Monroy, F., Álvarez, J., & Alvarado, O. (2017). DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN UN TRANSECTO DE LA GRANJA TUNGUAVITA, PAIPA. *U.D.C.A*, 20(1). Recuperado el 12 de noviembre de 2018, de <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v20n1/v20n1a11.pdf>

Morantes, R. (2014). Evaluación de la variabilidad espacial de suelos del predio hato viaje, municipio de la Plata. Colombia. Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de [file:///C:/Users/ACER/Downloads/152-332-1-SM%20\(6\).pdf](file:///C:/Users/ACER/Downloads/152-332-1-SM%20(6).pdf)

Mulla. (2012). *Chapter 20 - Modeling and Mapping Soil Spatial and Temporal Variability*. (H. Lin, Ed.) Boston: Academic Press .

Nielsen, D., & Wendroth, O. (2003). *Spatial and Temporal Statistics. Sampling Field Soils and Their Vegetation*. Catena Verlag, Reiskirchen.

Nielsen, D., Tillotson, P., & Vieira, S. (1993). *Analysing field measured soil water properties* (Vol. 6). Amsterdam: Agr.Water.Manag.

Obando, F., Villegas, A., Betancur, J., & Echeverri, L. (2006). Variabilidad espacial de las propiedades químicas y físicas en un Typic Udivitrands, arenoso de la región andina central Colombiana. *Facultad Nacional de Agronomía*, 59(1).

Orduz, J., Calderón, C., Bueno, G., & Baquero, J. (2011). Evaluación de gramíneas y leguminosas forrajeras como coberturas y su influencia en el control de malezas en el establecimiento de cítricos en el piedemonte del Meta. *Corpoica Cienc. Tecnol. Agropecu.*, 12(2). Recuperado el 12 de noviembre de 2018, de https://www.researchgate.net/publication/247164477_Evaluacion_de_gramineas_y_leguminosas_forrajeras_como_coberturas_y_su_influencia_en_el_control_de_malezas_en_el_establecimiento_de_citricos_en_el_piedemonte_del_Meta

- Ortega , R., & Flores, L. (1999). *Introducción al manejo sitio - específico*. Chile: Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Ovalles, F. (1991). *Evaluación de la variabilidad interna de los suelos a nivel de parcela para el establecimiento en lotes experimentales en el estado de Cojedes*. Agronomía Tropical.
- Patterson, J. (1977). *Soil compaction-effects on urban vegetation*. Arboriculture.
- Pellegrini, A., Sucunza, F., Millan, G., & Vazquez, M. (2016). Comparación de metodologías analíticas para diagnosticar suelos con enmiendas básicas en el ámbito templado argentino. *Ciencia del suelo*, 34(1). Recuperado el 12 de noviembre de 2018, de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672016000100001#tab1
- Petitgas, P. (1996). *Geostatistics and Their Applications to Fisheries Survey Data*. 5: 114-142. In: B. A. Megrey & E. Mosknes, (E). *Computers and Fisheries Research*. Chapman-Hall, Londres.
- Quintana, J., Blandon, J., Flores, A., & Mayorga, E. (1983). *Manual de fertilidad para suelos de Nicaragua*. Managua: Primer Territorio Indígena Libre de América Ithaca.
- Rabat, A. (2016). *Aplicabilidad del penetrómetro cónico en la determinación del límite líquido en suelos de baja y media plasticidad*. Recuperado el 19 de Marzo de 2018, de https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/58086/1/APLICABILIDAD_DEL_PENETROMETRO_CONICO_EN_LA_DETERMINACION_DEL_LIMITE_LIQUIDO_EN_SUELOS_DE_BAJA_Y_MEDIA_PLASTICIDAD Rabat_Blazquez_Alvaro.pdf
- Rahman, M., Okubo, A., Sugiyama, S., & Mayland, H. (2008). Physical, chemical and microbiological properties of an Andisol as related to land use and tillage practice. *Soil & Tillage Research, Amsterdam*.
- Ramirez Lopez, L., Reina Sanchez, A., & Camacho Tamayo, J. (2008). Variabilidad espacial de atributos físicos de un típico haplustox de los Llanos Orientales de Colombia. *Engenharia Agrícola*, 28(1). Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de <http://www.scielo.br/pdf/eagri/v28n1/a06v28n1>
- Raper, J., & Kirby, R. (2006). *Soil compaction: how to do it, undo it, or avoid doing it*. Estados Unidos.
- Roberts, T., & Henry, J. (2000). El muestreo de suelos: los beneficios de un buen trabajo. *Informaciones Agrícolas del Cono Sur*. Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de [http://www.ipni.net/publication/ia-la-hp.nsf/0/97F3E059E43811A0852579A300790776/\\$FILE/EI%20muestreo%20de%20suelos.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-la-hp.nsf/0/97F3E059E43811A0852579A300790776/$FILE/EI%20muestreo%20de%20suelos.pdf)

Rodriguez, C., Herrera, O., & Madero, E. (2000). efecto de la labranza en las propiedades físicas de un Vertisol Ustico y en la producción de sorgo, en el Valle del Cauca, Colombia. *Acta agronomica*, 50(1).

Rubio, A. (2010). *La densidad aparente en suelos forestales del parque natural los alcornocales*. Recuperado el 17 de Marzo de 2018, de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/57951/1/La%20densidad%20aparente%20en%20suelos%20forestales%20.pdf>

Rucks, L., García, F., Kaplán, A., Ponce de León, J., & Hill, m. (2004). *Propiedades Físicas del Suelo*. Recuperado el 17 de Marzo de 2018, de <http://bibliofagro.pbworks.com/f/propiedades+fisicas+del+suelo.pdf>

Sandoval, M., Dorner, J., Seguel, O., Cuevas, J., & Rivera, D. (2011). *Métodos de análisis físico de suelos*. Recuperado el 14 de Mayo de 2018, de http://www.trapananda.uach.cl/proyectos/desarrollo/lib/exe/fetch.php?media=proyectos:metodos_analisis_fisico_suelos.pdf

Santra, P., U.K, C., & D, C. (2008). *Spatial variability of soil properties and its application in predicting surface map of hydraulic parameters in a agricultural farm* (Vol. 95). Current Science.

Sellés, G., Ferreyra, R., Ruiz, R., & Ahumada, R. (2012). Compactación de suelos y su control. Estudio de casos en el Valle de Aconcagua. Santiago, Chile: Instituto de investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación la Platina.

Sun, B., Zhou, S., & Zhao, Q. (2003). Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma*, 1(2).

Tafur, H. (2005). *Conceptos basicos para el riego de los cultivos*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ciencias agropecuarias.

Toboada, & Alvarez. (2008). *Fertilidad física de los suelos* (segunda ed.).

TRAXCO. (2013). *Influencia del pH del suelo en los cultivos*. Recuperado el 23 de Noviembre de 2018, de <https://www.traxco.es/blog/labores-del-campo/influencia-del-ph-en-los-sistemas-de-cultivo>

Universidad de Extremadura. (2005). *Lección 5 Propiedades del suelo. Propiedades físico químicas. Reacción del suelo*. Recuperado el 12 de noviembre de 2018, de Área de Edafología y Química Agrícola, Facultad de ciencias: <https://www.eweb.unex.es/eweb/edafo/ECAP/ECAL5PFQReaccion.htm>

Valle, S. (2014). *La importancia de la variabilidad espacial de los suelos*. Recuperado el 13 de noviembre de 2018, de El mercurio: <https://www.elmercurio.com/Campo/Noticias/Analisis/2013/06/20/Relevancia-de-la-variabilidad-espacial-de-los-suelos.aspx>

Valle, S., Carrasco, J., Pinochet, D., & MacDonald, R. (2014). Variabilidad espacial y temporal de la disponibilidad de nutrientes y la condición de acidez de suelos volcánicos. *AGROSUR*, 42(3). Recuperado el 6 de Octubre de 2018, de <http://www.agrarias.uach.cl/wp-content/uploads/2016/04/art02-Valle.pdf>

Valvuenza, C., Martínez, L., & Giraldo, R. (2008). VARIABILIDAD ESPACIAL DEL SUELO Y SU RELACION CON EL RENDIMIENTO DE MANGO (*Mangifera indica* L.). *Rev. Bras*, 30(4). Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de <http://www.scielo.br/pdf/rbf/v30n4/a49v30n4.pdf>

Vargas, R., Serrato, F., & Torrente, A. (2015). Variabilidad espacial de las propiedades físicas de un suelo Fluventic Ustropepts en la cuenca baja del río Las Ceibas - Huila. *Revista Ingeniería y Región*, 13(1). Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de <https://www.journalusco.edu.co/index.php/iregion/article/viewFile/713/1364>

Vargas, S. R., Serrato, C. F., & Torrente, T. A. (2015). Variabilidad espacial de las propiedades físicas de un suelo Fluventic Ustropepts en la cuenca baja del río Las Ceibas - Huila. *Revista Ingeniería y Región*. Recuperado el 13 de 11 de 2018, de https://www.journalusco.edu.co/index.php/iregion/article/view/713/1365?fbclid=IwAR3XFXtNDjKQrmz2vLrcvBljZmvVAcCJcXcg1_nbkHtl2f1kxLxzdr1Ux4M

Vasquez, J. (2009). *CARACTERIZACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS EN LOS SUELOS DE LA GRANJA EXPERIMENTAL DE LA UNIVERSIDAD DEL MAGDALENA*. Recuperado el 22 de Mayo de 2018, de <http://www.bdigital.unal.edu.co/698/1/JoseRafaelVasquezPolo.2009.pdf>

Viera, F. (2015). *Evaluación de tecnologías de manejo de arvenses en el cultivo de la caña azucar (*Saccharum ssp. híbrido*)*. Recuperado el 13 de Noviembre de 2018, de http://oa.upm.es/38571/1/FRANK_JORGE_VIERA_BARCELO.pdf

Villacorta, S. (2014). *Distribución espacial de las propiedades físico químicas del suelo de los palmicultores de shambillo*. Recuperado el 24 de Abril de 2018, de file:///C:/Users/ACER/Downloads/TS_VJS_2014.pdf

Webster, R., & Oliver, M. (2007). *Geostatistics for environmental scientists* (2 ed.). England: John Wiley & Sons.

Xavier, R., & Déleg, P. (2018). *"Determinación de la variabilidad espacial de las características físicas del suelo en la parcela Experimental Irquis"*. Recuperado el 6 de Octubre de 2018, de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/30227/1/Trabajo%20de%20Titulaci%C3%B3n.pdf>

Yasrebi, j., M, S., H, F., N, K., M, E., & M, B. (2008). *Spatial variability of soil fertility properties for precisi3n agricultura in southern Iran*. (Vol. 8). Journal of Applied Sciences.

Zhao, Y., Peth, S., Krümmelbein, J., Horn, R., Wang, Z., & Steffens, M. (2007). Spatial variability of soil properties affected by grazing intensity in Inner Mongolia grassland. *Ecol. Modelling* .