



# UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA HUMEDAD Y LAS FRACCIONES  
GRANULOMÉTRICAS EN UN SUELO INCEPTISOL EN MACHALA,  
PROVINCIA DE EL ORO

AGUILAR SARANGO MARIA JOSE  
INGENIERA AGRÓNOMA

MACHALA  
2020



# UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGRÓNOMICA

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA HUMEDAD Y LAS  
FRACCIONES GRANULOMÉTRICAS EN UN SUELO  
INCEPTISOL EN MACHALA, PROVINCIA DE EL ORO

AGUILAR SARANGO MARIA JOSE  
INGENIERA AGRÓNOMA

MACHALA  
2020



# UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS

CARRERA DE INGENIERÍA AGRÓNOMICA

TRABAJO TITULACIÓN  
TRABAJO EXPERIMENTAL

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA HUMEDAD Y LAS FRACCIONES  
GRANULOMÉTRICAS EN UN SUELO INCEPTISOL EN MACHALA, PROVINCIA  
DE EL ORO

AGUILAR SARANGO MARIA JOSE  
INGENIERA AGRÓNOMA

CHABLA CARRILLO JULIO ENRIQUE

MACHALA, 17 DE MARZO DE 2020

MACHALA  
2020

# Variabilidad espacial de la humedad y las fracciones granulométricas en un suelo inceptisol en Machala Provincia El Oro

## INFORME DE ORIGINALIDAD

3%

INDICE DE SIMILITUD

3%

FUENTES DE INTERNET

1%

PUBLICACIONES

1%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1

[eprints.uanl.mx](https://eprints.uanl.mx)

Fuente de Internet

1%

2

[repository.usta.edu.co](https://repository.usta.edu.co)

Fuente de Internet

1%

3

Submitted to UNIV DE LAS AMERICAS

Trabajo del estudiante

1%

4

[myslide.es](https://myslide.es)

Fuente de Internet

1%

5

[repositorio.unas.edu.pe](https://repositorio.unas.edu.pe)

Fuente de Internet

1%

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias

< 50 words

Excluir bibliografía

Apagado

## CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

La que suscribe, AGUILAR SARANGO MARIA JOSE, en calidad de autora del siguiente trabajo escrito titulado VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA HUMEDAD Y LAS FRACCIONES GRANULOMÉTRICAS EN UN SUELO INCEPTISOL EN MACHALA, PROVINCIA DE EL ORO, otorga a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tiene potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

La autora declara que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

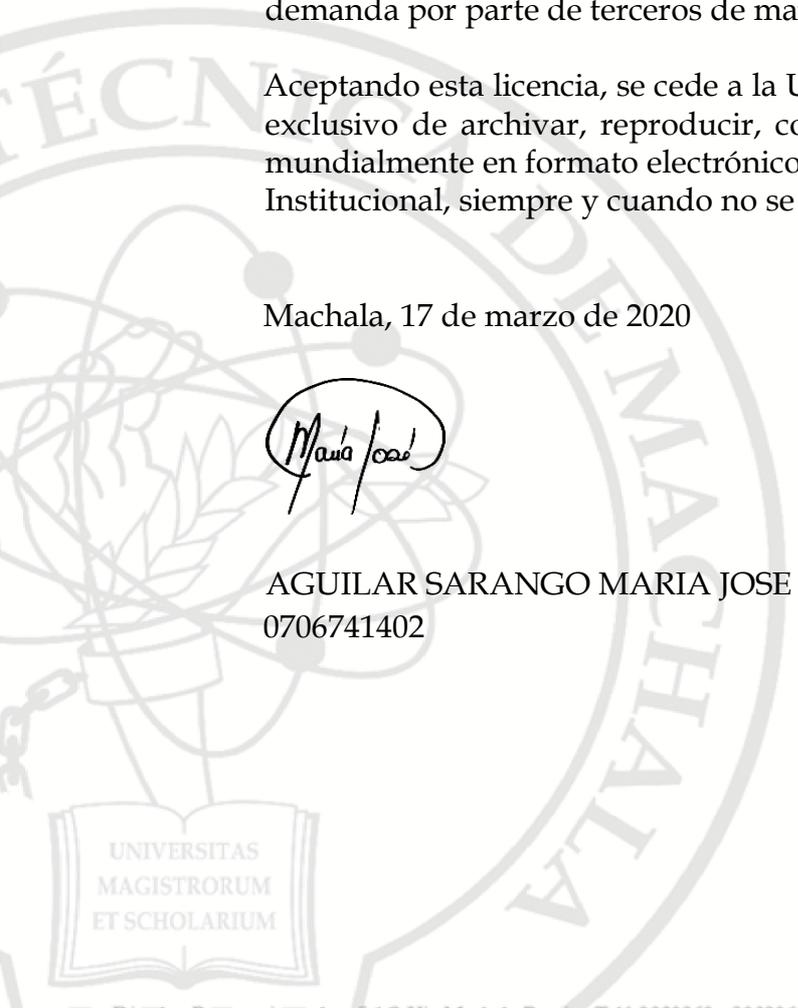
La autora como garante de la autoría de la obra y en relación a la misma, declara que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asume la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.

Machala, 17 de marzo de 2020



AGUILAR SARANGO MARIA JOSE  
0706741402



UNIVERSITAS  
MAGISTRORUM  
ET SCHOLARIUM

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a cada uno de mi familia, quienes han sido mis pilares para seguir adelante, gracias por ser parte de mi vida y por permitirme ser su orgullo.

Es para mí una gran satisfacción poder dedicar mi trabajo a mi hija Dalithy, quien fue mi motivación más grande para concluir con éxito este proyecto, eres la razón por la cual me levanto cada día para esforzarme. Muchas gracias hija.

## **AGRADECIMIENTO**

Amado Dios gracias por ayudarme a encontrar mi camino y permitirme cumplir una meta más en mi vida, real es cuando dicen que en tus tiempos todo es bonito y perfecto.

Dentro de mi querida familia infinitas gracias a mi madre Elizabeth por su sacrificio para sacarme adelante y a mi padre José por brindarme su apoyo. A mis tías Paola, Teresa y Patty por creer siempre en mí y ser parte de mi vida. A mis tíos Nayo, Richard por llenarme de consejos y a mi William (+) porque sé que estarías orgulloso de mi logro donde quiera que estés. A mis queridos hermanos por ser un apoyo constante en los trayectos de mi vida y llenarme de felicidad.

Agradezco a mi tutor de tesis, al Ing. Julio Chabla Carillo. PhD, por su dedicación y compromiso en todo el proceso de realización de esta tesis. Al Ing. Salomón Barrezueta, PhD y al Ing. Edison Jaramillo, MSc por los conocimientos brindados, su ayuda fue fundamental para la culminación de este proyecto de investigación

De manera especial agradezco a Robert Coello por siempre estar presente con su apoyo incondicional, a Jefferson Carrión por brindarme ánimos y ser mi buen amigo. De igual manera agradecer a Edison Cueva, Miguel Quezada, Emerson Cuenca y a Ruth Eras por brindarme su infinita ayuda en la elaboración de esta investigación.

## RESUMEN

La variabilidad de las propiedades físicas de los suelos es espacial, los inceptisoles debido a que están en continuo desarrollo contienen mayor variabilidad que suelos más evolucionados. La variación depende generalmente del tipo de suelo y la propiedad a analizar. Al conocer la variabilidad espacial de la humedad, nos permite plantear mejoras en el uso eficiente del recurso agua para así obtener una buena rentabilidad en la producción agrícola y con menor impacto ambiental. En vista de que la variabilidad espacial del suelo afecta la distribución en el perfil del agua se realizó el análisis de la humedad del suelo y la relación con algunas de las propiedades físicas en un suelo de orden inceptisol con el objetivo de estudiar el comportamiento de la humedad aprovechable en base a la fracción granulométrica y densidad apoyado de un análisis multivariado de ciertas propiedades físicas a través de los mapas del kriggeado de la distribución espacial de los atributos físicos para ver su variabilidad espacial en la Finca “La Flor” (Machala, Ecuador) dedicada a la producción de banano. Dentro de los principales problemas que ocasiona la baja productividad del suelo es la ejecución incorrecta de las prácticas de manejo agrícola, lo que provoca el deterioro de las propiedades físicas, las cuales son importantes debido a que regulan el movimiento del agua dentro del suelo y su evaluación y caracterización son de gran ayuda para programar soluciones a problemas de compactación, drenajes, fertilidad y la baja productividad. El suelo junto a factores como agua-planta son clave importante para el desarrollo y la productividad del cultivo de banano debido a que el suelo es el principal suministrador de agua para las plantas por su gran capacidad de almacenamiento y la relación directa que tiene con la capacidad de la planta para remover una parte del agua en el suelo. La humedad del suelo constituye un papel principal en el comportamiento de las propiedades físicas porque a través de este se transporta sustancias. En el área de la investigación se realizó el levantamiento planimétrico de la finca con un GPS, la información geográfica se la procesó en el software AutoCAD 2017 usando una grilla 80 x80 obteniendo tres puntos de muestreo donde se realizaron calicatas con escalinata a una distancia de 0m, 3m, 6m, 9m y 12 m localizadas en el eje de “x” y el eje “y” con 2 profundidades de suelo de 0-25 y 25-50 cm, con la finalidad de obtener un total de 58 muestras para determinar propiedades físicas del suelo como: textura, densidad aparente, densidad real, contenido de materia orgánica, pH, porosidad, conductividad eléctrica y el contenido de humedad. Las muestras fueron procesadas usando la metodología de los protocolos en el laboratorio de suelos ubicado en la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad Técnica de Machala. Con los datos

obtenidos se estimó parámetros de tendencia central, dispersión y distribución en el software IBM SPSS STATICS 22 donde el análisis estadístico de componente principales indica 73,12 % de la varianza total. Esto conformó tres componentes principales, donde el primer CP se obtuvo un mayor coeficiente de correlación para arena, limo y arcilla, mientras que porosidad; Da; MO y HA en los CP 2 y 3 respectivamente, este método nos permite apreciar el comportamiento de las variables. Se realizó un análisis geo estadístico utilizando el software Arcmap versión 10.3 (2014) utilizando los parámetros del semivariograma para la interpolación por el método del kriging para el diseño de mapas de variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo, los cuales proveen de información importante para el manejo de la finca y futuras tomas de decisiones.

**Palabras clave:** humedad, propiedades físicas del suelo, geo estadística, variabilidad espacial

## ABSTRACT

The variability of the physical properties of the soils is spatial, the inceptisols because they are in continuous development contain greater variability than more evolved soils. The variation generally depends on the type of soil and the property to be analyzed. By knowing the spatial variability of humidity, it allows us to propose improvements in the efficient use of the water resource in order to obtain a good profitability in agricultural production and with less environmental impact. In view of the fact that the spatial variability of the soil affects the distribution in the water profile, the soil moisture analysis and the relationship with some of the physical properties in an inceptisol soil were performed with the objective of studying the behavior of the soil. Usable humidity based on the granulometric fraction and density supported by a multivariate analysis of certain physical properties through the maps of the spatial distribution of physical attributes to see their spatial variability in the Finca "La Flor" (Machala, Ecuador) dedicated to banana production. Among the main problems caused by low soil productivity is the incorrect execution of agricultural management practices, which causes the deterioration of physical properties, which are important because they regulate the movement of water within the soil and its Evaluation and characterization are helpful to program solutions to problems of compaction, drainage, fertility and low productivity. Soil along with factors such as water-plant are an important key to the development and productivity of banana cultivation because the soil is the main water supplier for the plants due to its large storage capacity and the direct relationship it has with the ability of the plant to remove a part of the water in the soil. Soil moisture is a major role in the behavior of physical properties because substances are transported through it. In the area of the investigation, the planimetric survey of the farm was carried out with a GPS, the geographic information was processed in the AutoCAD 2017 software using an 80 x80 grid, obtaining three sampling points where test pits were made with stairs at a distance of 0m , 3m, 6m, 9m and 12m located on the "x" axis and the "y" axis with 2 soil depths of 0-25 and 25-50 cm, in order to obtain a total of 58 samples to determine physical properties of the soil such as: texture, bulk density, real density, organic matter content, pH, porosity, electrical conductivity and moisture content. The samples were processed using the methodology of the protocols in the soil laboratory located in the Faculty of Agricultural Sciences of the Technical University of Machala. With the data obtained, parameters of central tendency, dispersion and distribution were estimated in the IBM SPSS STATICS 22 software, where the statistical analysis of main components indicates 73.12%

of the total variance. This conformed three main components, where the first CP obtained a higher correlation coefficient for sand, silt and clay, while porosity; Gives; MO and HA in PC 2 and 3 respectively, this method allows us to appreciate the behavior of the variables. A geo-statistical analysis was performed using the Arcmap version 10.3 (2014) software using the semivariogram parameters for interpolation by the kriging method to design spatial variability maps of the physical properties of the soil, which provide important information for farm management and future decision making.

**Keywords:** humidity, physical properties of the soil, statistical geo, spatial variability

## INDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	12
OBJETIVOS.....	12
Objetivo general.....	13
Objetivos específicos.....	13
2. MARCO TEÓRICO.....	14
2.1. Variabilidad espacial de los suelos.....	14
2.2. Variabilidad de las propiedades físicas del suelo.....	14
2.2.1. Densidad real.....	14
2.2.2. Densidad aparente.....	15
2.2.3. Porosidad.....	15
2.2.4. Humedad del suelo.....	16
2.2.5. pH.....	17
2.2.6. Materia orgánica.....	17
2.2.7. Conductividad eléctrica.....	17
2.2.8. Capacidad de campo.....	18
2.2.9. Punto de marchitez permanente.....	19
2.3. Variables edáficas.....	19
2.3.1. Granulometría.....	19
2.3.2. Arcilla.....	20
2.3.3. Limo.....	20
2.3.4. Arena.....	21
2.4. Análisis y representación de la dependencia espacial Geoestadística.....	21
2.4.1. Geoestadística.....	21
2.4.2. Método de interpolación.....	21
2.4.3. Método del Kriging.....	22
2.4.4. Semivariograma.....	22
2.4.5. Nugget.....	23
2.4.6. Sill.....	23
2.4.7. Rango.....	24

3.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	25
3.1.	Fase de campo.....	25
3.1.1.	Levantamiento perimetral del área de estudio.....	25
3.1.2.	Clima y ecología.....	26
3.1.3.	Materiales, equipos y reactivos utilizados en la investigación .....	26
3.2.	Metodología Fase de campo .....	27
3.2.1.	Metodología utilizada para la toma de muestras .....	27
3.3.	Fase de laboratorio.....	27
3.3.1.	Tamizado de la muestra de suelo.....	27
3.3.2.	Método para determinar textura.....	27
3.3.3.	Método para determinar la materia orgánica por el método de ignición .....	28
3.3.4.	Método para la determinación de la densidad real .....	28
3.4.	Análisis estadístico .....	29
3.5.	Análisis geoestadístico .....	29
4.	RESULTADOS.....	31
4.1.	Análisis descriptivo de las propiedades físicas del suelo .....	31
4.2.	Análisis multivariado .....	35
4.3.	Análisis de la variabilidad espacial de suelos.....	37
5.	CONCLUSIONES.....	50
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	51
7.	ANEXOS.....	56

## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Clasificación de los suelos en base a la CE y el efecto general sobre los cultivos.....	18
<b>Tabla 2.</b> Estadística descriptiva de las propiedades físicas del suelo .....	35
<b>Tabla 3.</b> Matriz de Correlación de Pearson de las propiedades físicas del suelo .....	36
<b>Tabla 4.</b> Análisis de componentes principales.....	37
<b>Tabla 5:</b> Parámetros del semivariograma aplicando krigging ordinario para las variables en estudio.....	38

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Formación de huecos de empaquetamiento compuesto .....	16
<b>Figura 2.</b> Parámetros del semivariograma .....	23
<b>Figura 3.</b> Levantamiento perimetral del área de estudio .....	25
<b>Figura 4.</b> Diagrama de caja y bigotes por estratos: a) Dr, b) Da .....	31
<b>Figura 5.</b> Diagrama de caja y bigote de porcentaje de arena, limo y arcilla a 2 profundidades de estudio	32
<b>Figura 6.</b> Diagrama de caja y bigote de porcentaje de porosidad a 2 profundidades de estudio .....	33
<b>Figura 7.</b> Diagrama de caja y bigote de porcentaje de MO a 2 profundidades de estudio .....	33
<b>Figura 8.</b> Diagrama de caja y bigote de porcentaje de HA a 2 profundidades de estudio .....	34
<b>Figura 9.</b> Distribución espacial de Dr a 25 cm y 50 cm de profundidad. ....	40
<b>Figura 10.</b> Distribución espacial de Da a 25 cm y 50 cm de profundidad. ....	41
<b>Figura 11.</b> Distribución espacial de la textura arena a 25 cm y 50 cm de profundidad.....	42
<b>Figura 12.</b> Distribución espacial del limo a 25 cm y 50 cm de profundidad.....	43
<b>Figura 13.</b> Distribución espacial de la arcilla a 25 cm y 50 cm de profundidad. ....	44
<b>Figura 14.</b> Distribución espacial de la porosidad a 25 cm y 50 cm de profundidad.....	45
<b>Figura 15.</b> Distribución espacial de la MO a 25 cm y 50 cm de profundidad.....	46
<b>Figura 16.</b> Distribución espacial del pH a 25 cm y 50 cm de profundidad .....	47
<b>Figura 17.</b> Distribución espacial de la Conductividad eléctrica a 25 cm y 50 cm de profundidad. ....	48
<b>Figura 18.</b> Distribución espacial de la Ha a 25cm y 50 cm de profundidad.....	49

## INDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1:</b> Semivariogramas de la densidad real (g/cm <sup>3</sup> ) en un perfil de 50 cm. ....	56
<b>Anexo 2:</b> Semivariogramas de la densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> ) en un perfil de 50 cm. ....	59
<b>Anexo 3:</b> Semivariogramas del pH (%) en un perfil de 50 cm. ....	61
<b>Anexo 4:</b> semivariogramas del CE (ds/m) en un perfil de 50 cm. ....	63
<b>Anexo 5:</b> semivariogramas de la MO (%) en un perfil de 50 cm. ....	65
<b>Anexo 6:</b> Semivariograma de las Arcillas (%) en un perfil de 50 cm.....	67
<b>Anexo 7:</b> Semivariograma de la Arena (%) en un perfil de 50 cm. ....	69
<b>Anexo 8:</b> Semivariograma de la Porosidad (%) en un perfil de 50 cm. ....	71
<b>Anexo 9:</b> Semivariograma de la Humedad Aprovechable en un perfil de 50 cm. ....	73
<b>Anexo 10:</b> Semivariogramas del limo en un perfil de 50 cm.....	75
<b>Anexo 11:</b> Calicata para la toma de muestra.....	77
<b>Anexo 12:</b> Toma de muestras utilizando cilindros metálicos .....	77
<b>Anexo 13:</b> Extracción de la muestra .....	78
<b>Anexo 14:</b> Secado al ambiente de las muestras .....	78
<b>Anexo 15:</b> Determinación de la densidad real .....	79
<b>Anexo 16:</b> Determinación de la textura .....	79

## **1. INTRODUCCIÓN**

La humedad aprovechable estimada a partir de las curvas de retención de humedad del suelo es un parámetro determinante para el diseño e implementación de sistemas de irrigación. En este estudio la relación de la humedad aprovechable con ciertos atributos físicos como la densidad real y aparente, textura, y porosidad serán analizados utilizando métodos estadísticos uni y multivariados.

El estudio se lo realizó en una finca de ocho hectáreas en un suelo del orden inceptisol con cultivo de banano, evaluando los dos primeros estratos hasta una profundidad de 50 centímetros. La estructura del suelo y la porosidad permiten caracterizar la capacidad que puede tener un suelo en retener la humedad. Así al estudiar su interacción con la disponibilidad hídrica permitirá optimizar el recurso hídrico y establecer mejores prácticas agrícolas que inducirán a una mayor producción.

El estudio del comportamiento de las fracciones granulométricas fueron mejor entendidas haciendo uso de ciertas técnicas estadísticas multivariadas que permitirán comprender e inferir cual fue la calidad física del suelo de una manera integral, tal como lo señala (Fidalski, 2007), que un estudio multivariado puede en determinadas circunstancias comprometer el comportamiento de alguna de las variables de estudio dado que no se toma en cuenta las relaciones de interdependencia entre las variables.

Para ello fue necesario efectuar un análisis de componentes principales (ACP) en la que busca reducir ciertas variables no correlacionadas entre sí.

## **OBJETIVOS**

**Objetivo general**

Estudiar el comportamiento de la humedad aprovechable en base a la fracción granulométrica y densidad del suelo apoyado de un análisis multivariado de ciertas propiedades físicas a través de los mapas de kriggeado de la distribución espacial de los atributos físicos para ver su variabilidad.

**Objetivos específicos**

- Efectuar el análisis estadístico uni y multivariado de ciertas propiedades físicas.
- Relacionar la humedad aprovechable con la fracción granulométrica y la densidad del suelo.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. Variabilidad espacial de los suelos**

La variabilidad de los suelos se presenta cuando los valores de la variable dependen de la ubicación y del espaciamiento de las muestras (Jaramillo, 2006), aquellas que de la misma forma obedecen al tipo de suelo y la propiedad a analizar. En suelos con mayor uso agropecuario hay más variabilidad debido a la alteración que sufren sus propiedades por el manejo del suelo (Ovalles, 1992).

Se conoce también que la variabilidad de los suelos sucede de forma natural a causa de los ciclos y formación del suelo, ya sean los cambios desarrollados en el relieve, estructura y el clima, todo esto tiene como resultado las variantes en la cobertura vegetal, así mismo, los diferentes procesos de erosión, los cuales tienen impacto en la disposición del suelo (Rodríguez, Camacho, & Rubiano, 2016).

Por medio de la caracterización de la variabilidad de las propiedades del suelo podemos entender su desarrollo en diferentes condiciones y obtener mejores prácticas de manejo del suelo y cultivo (Goovaerts, 1999), aquello que a su vez contribuirá a optimizar la calidad del suelo contando con técnicas estratégicas como la agricultura de precisión (Santiago, Martínez, Rubio, Vaquera, & Sánchez, 2018).

### **2.2. Variabilidad de las propiedades físicas del suelo**

#### **2.2.1. Densidad real**

Por densidad real nos referimos al peso del material sólido que compone al suelo. La densidad real del suelo depende de la composición, minerales y de la materia orgánica que contiene. Al no presentar grandes cantidades de materia orgánica la densidad real se encuentra entre 2,5 y 2,6 g/cc y obtiene un valor mayor en suelos de contenido arcilloso o arenosos con poca materia orgánica (Ramírez, 1997).

### **2.2.2. Densidad aparente**

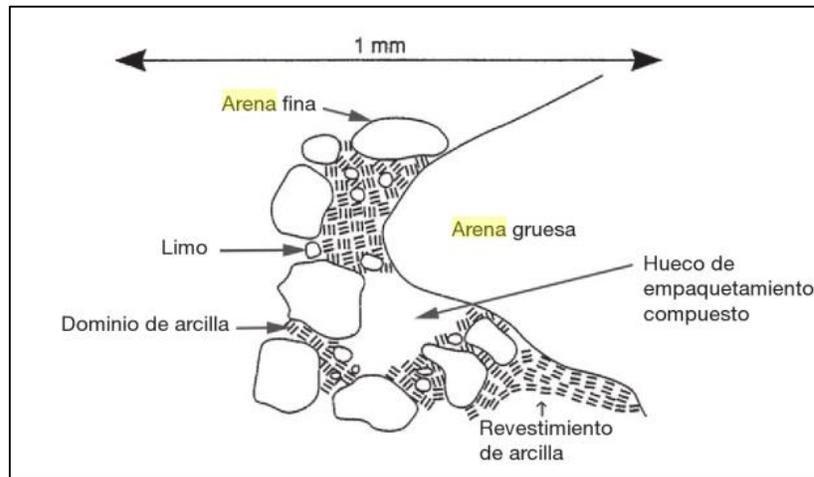
La densidad aparente es uno de las pocas variables del suelo que permiten evaluar las condiciones físicas de un suelo (Mori, Alavi, & Mooney, 2017). Esta variable también se encuentra relacionada con la capacidad que tiene el suelo para sostener las plantas y almacenar carbono; se considera que un suelo medianamente denso tendrá una estructura óptima y su área de desenvolvimiento será mayor a la de un suelo con baja densidad, la densidad es un parámetro que ayuda a predecir si un suelo tiene buena capacidad de retención de agua y nutrientes, así también, regula el movimiento dentro del suelo, ya sea de agua o aire hacia el ecosistema externo (Lobsey & Viscarra, 2016).

Esta variable es considerada en estudios que pretender determinar si el área de un suelo se encuentra compactada, ya sea por actividades antropogénicas o naturales (Villalobos & Meza, 2019).

### **2.2.3. Porosidad**

La porosidad en el suelo es el espacio que existe entre una aglomeración de partículas de arena (espacio intergranular), las cuales poseen el mismo tamaño, es decir, son homométricos, este espacio depende del tamaño de las partículas de arena que existan en el suelo, el espacio mencionado entre partículas recibe el nombre de huecos de empaquetamiento simple, sin embargo, los suelos se componen de diferentes tipos de partículas, como son sus componentes principales (arena, limo y arcilla), en conjunto con material orgánico presente da como resultado el desarrollo de micro y macroagregados, lo que quiere decir que se formaran espacios intergranulares de mayor tamaño llamados huecos de empaquetamiento compuesto (Figura 1) (Porta, Lopez, & Poch, 2014).

La presencia de una buena porosidad es equivalente a un óptimo flujo de agua y aire, pero esto es recomendable medirlo con los sistemas pertinentes (Liu, Dugan, Masiello, & Gonnermann, 2017).



**Figura 1.** Formación de huecos de empaquetamiento compuesto

**Fuente:** Porta, López & Poch (2014)

#### 2.2.4. Humedad del suelo

La humedad del suelo tiene un rol fundamental dentro de los ciclos hidrológicos en los ecosistemas, varias de estas funciones que cumplen es la formación de escorrentías, permitir la respiración del suelo, el cumplimiento del ciclo del carbono y el equilibrio de los nutrientes del suelo, así mismo, influye considerablemente en los procesos de formación de suelo, además de contribuir a la evapotranspiración de las plantas, puesto que sirve como reservorio de agua (Gunda, Nawagamuwa, & Hornberger, 2017).

Porta, Poch y Lopez-Acevedo (2019) “Hace referencia a la disponibilidad de agua en el suelo a lo largo del año (cantidad de agua y estacionalidad) Condiciona el comportamiento del frente de humectación, los procesos edafogénicos y las disponibilidades de agua para las plantas.” El estudio global de la humedad del suelo favorece al campo científico dirigido hacia la hidrología, agricultura y ecología, esta también es considerada una variable importante para el pronóstico del

clima, a pesar de la importancia en la que radica el estudio de la humedad del suelo, las investigaciones de la misma son escasas ya sea de manera espacial o temporales (Liu, et al., 2018).

### **2.2.5. pH**

El pH es una propiedad física-química de gran importancia en los suelos pues influye en la disponibilidad de nutrientes para el cultivo y en la actividad de microorganismos, los cuales son encargados de la mineralización de la materia orgánica. Para obtener los mejores rendimientos y asegurar una mayor productividad el pH del suelo debe ser de 6,5 a 7,0 ya que dentro de esos valores los nutrientes son más asimilables para los cultivos. Cuando el pH se encuentra con valores cercanos a 7 esto nos da como resultado una mayor solubilidad para los elementos provocando un alto porcentaje de saturación de bases (Ramirez, 1997).

Los cultivos que se desarrollan en suelos con pH ácidos muestran síntomas de toxicidad debido a la mayor solubilidad de elementos químicos como el aluminio (Al), hidrógeno (H) y manganeso (Mn), generando deficiencias nutricionales de calcio (Ca) y Magnesio (Mg).

### **2.2.6. Materia orgánica**

La materia orgánica se encuentra presente dentro de los horizontes de la superficie del suelo conocidos como horizontes O y A, aquellos que son fuentes fundamentales de la misma, esta materia orgánica incluye ácidos orgánicos y elementos inorgánicos solubles. La materia orgánica presente en el suelo provienen generalmente de tejidos orgánicos y residuos celulares de otras plantas, de igual forma, se pueden encontrar restos leñosos y raíces, sin embargo, las heces comprende el mayor porcentaje dentro de los suelos, así como material fúngico que se presenta en forma de hifas, esclerocios y vinas micorrízico (Stoops, Marcelino, & Mees, 2018).

### **2.2.7. Conductividad eléctrica**

Es un término que se refiere específicamente al flujo del agua y es un parámetro que define la facilidad que tiene el medio poroso para transmitir agua a través del mismo en suelos, la

conductividad hidráulica depende del fluido y del medio poroso en conjunto cuando el medio poroso está saturado se dice que ha alcanzado la máxima conductividad hidráulica (Preene Groundwater Consulting, 2014).

Se entiende como conductividad eléctrica a la facultad que posee un componente que posibilita el flujo de electricidad o energía mediante sus propias partículas, esta capacidad es conforme a la organización atómica del material o a los distintos factores bióticos y abióticos. El suelo presenta propiedades fisicoquímicas y es donde la conductividad eléctrica ayuda a un diagnóstico de las características de la tierra para lograr ver su calidad y fertilidad dependiendo de la salinidad de cada uno de ellos (Tabla 1) (Domenech, 2017).

**Tabla 1.** Clasificación de los suelos en base a la CE y el efecto general sobre los cultivos

CE <sub>e</sub>	Condiciones de salinidad y efecto sobre las plantas
<1	<b>Suelo libre de sales.</b> No existe restricción para ningún cultivo.
1-2	<b>Suelo muy bajo en sales.</b> Algunos cultivos muy sensibles pueden ver restringidos sus rendimientos.
2-4	<b>Suelo moderadamente salino.</b> Los rendimientos de cultivos sensibles pueden verse afectados en su rendimiento.
4-8	<b>Suelo salino.</b> El rendimiento de casi todos los cultivos se ve afectado por esta condición de salinidad.
8-16	<b>Suelo altamente salino.</b> Solo los cultivos muy resistentes a la salinidad pueden crecer en estos suelos.
>16	<b>Suelo extremadamente salino.</b> Prácticamente ningún cultivo convencional puede crecer económicamente en estos suelos.

**Fuente:** (Castellanos, 2000)

### 2.2.8. Capacidad de campo

La capacidad de campo o capacidad de retención es la cantidad de agua retenida por el suelo después de que el exceso se haya drenado. La CC cuando se presenta al principio el drenaje es muy rápido, pero después comienza una fase de drenaje lento que puede durar hasta quince días. El estado de capacidad de campo permite clasificar los poros, los macro poros están ocupados en gran parte por aire y los micro poros por agua. Es una situación muy favorable para las plantas, ya que permite la absorción radicular. La porosidad total (E) es la suma de la macro porosidad debida a los poros grandes y micro porosidad a los pequeños que, como se ha visto, es el contenido de

humedad del suelo a capacidad de campo, por lo que se representa como CC (Universidad Nacional de Colombia, s.f., págs. 9,10).

### **2.2.9. Punto de marchitez permanente**

El punto de marchitez permanente (PMP) representa a la tensión máxima de la planta para extraer el agua y su estimación tiene relación directa con la textura del suelo. Cuando la capacidad de absorción del agua aumenta por la presencia de los micro poros en suelos con altos contenidos de arcilla se obtendrá valores más altos de PMP % (Hernandez, Diaz, & Cerana, 2019).

## **2.3. Variables edáficas**

### **2.3.1. Granulometría**

La granulometría se conoce como la distribución del tamaño de una partícula, la cual desarrolla una descripción del tamaño de dicha partícula y su frecuencia dentro de un sitio o población; la granulometría pertenece a una extensa gama de aplicaciones en distintos campos como en las farmacéuticas, ingeniería de alimentos, fabricación de papel, procesos geológicos, debido a que el producto final y sus propiedades dependen de la forma y tamaño de sus partículas (Labati, Genovese, Muñoz, Piuri, & Scotti, 2018).

Dentro de los sistemas edáficos la granulometría se relaciona con el funcionamiento de los sistemas de poros encargados del flujo de aire dentro del suelo, aquel que puede verse afectado por deformaciones en el mismo. El tamaño de las partículas del suelo influye estrechamente en dicho flujo de aire, ya que es posible la existencia de diferentes capacidades de retención de agua, distribución y continuidad de los poros afectando la aireación del suelo (Mentges, Reichert, Rodrigues, Awe, & Mentges, 2016).

De acuerdo con Eremin y Eremina (2016), las partículas del suelo y su tamaño son considerados unos de los factores más importantes dentro de la formación de los suelos, ya que

tiene una amplia relación con el ya mencionado flujo de aire, las variaciones térmicas, físicas y mecánicas del agua. La composición granulométrica forma parte de las principales variables de clasificación taxonómica de los suelos; a este factor también se le atribuye el nivel de fertilidad del suelo, ya que esta ayuda a medir procesos de erosión, acumulación de metales pesados u otros elementos dañinos para el mismo.

### **2.3.2. Arcilla**

Es un agregado de partículas minerales microscópico, abarcan un tamaño de grano  $>$  de 0,002m por lo tanto tienen una gran área de superficie debido a que sus partículas tienen una forma laminar y gran volumen, su tamaño de grano es tan pequeño que actúan como coloides, y presentan propiedades de adhesión y plasticidad debido a la presencia de cantidad significativa de minerales de arcilla (Berry & Reid, 1993).

### **2.3.3. Limo**

El limo con dimensiones entre arena y arcilla, es un material de origen mineral entre cuarzo y feldespato, que por su característica granular logra ser fácilmente transportado y depositado por el agua. La facilidad de transporte que brinda cada partícula, permite en las fuertes lluvias que en su escurrimiento exista partículas granulares finas como limo, que a su vez se depositan en la profundidad de la tierra, en ríos o estques como sedimento, lo cual proporciona un valor nutricional al suelo destacable para plantas e insectos (Bashir & Kour, 2018; Shete, Deshmukh, & Kayte, 2019).

Se compone de minerales que son productos de la meteorización, es un tipo de suelo que su plasticidad es poca o nula, y es más permeable que las arcillas, este tamaño de grano contiene partículas entre 0,060 y 0,002 mm y son denominados por el termino suelo fino (grano fino) las partículas de limo tienen un tamaño microscópico que no son visibles a simple vista (Berry & Reid, 1993).

#### **2.3.4. Arena**

Los suelos arenosos comprenden de una baja cantidad de materia orgánica por lo que no se aprovecha completamente los nutrientes debido a la poca humedad que se presenta en ellos, además son ásperos que sufren de erosiones por lo que no retiene bien los nutrientes minerales que se necesitan para los cultivos (Palma-López, 2017).

### **2.4. Análisis y representación de la dependencia espacial Geoestadística**

#### **2.4.1. Geoestadística**

La geoestadística se desarrolló inicialmente para investigaciones en la industria minera, actualmente sus campos de aplicación se han extendido a las ciencias ambientales como suelo, agua y aire. Generalmente los investigadores utilizan estas herramientas geoestadísticas para realizar mapas de las diferentes variables o características de interés dentro de un área (Oliver & Webster, 2015).

La principal aplicación de la geoestadística al suelo es la estimación de mapas de atributos del suelo en áreas no muestreadas y a su vez conocer las variantes dentro de las propiedades de los suelos, para poder realizar predicciones e interpretaciones para su manejo y mejora. Estas herramientas geoestadísticas se han usado a lo largo del tiempo por profesionales de la edafología, debido a las amplias propiedades que ofrecen como estudiar los parámetros físicos, químicos y morfológicos de los suelos (Monroy, Álvarez, & Alvarado, 2017).

#### **2.4.2. Método de interpolación**

De manera general los métodos de interpolación se dividen en dos grandes grupos, los cuales son: global y local, donde el grupo con enfoque global de acuerdo con Webster y Oliver (1990), señalan:

“El enfoque global principal es el análisis de superficie de tendencia, mediante el cual los polinomios o, a veces, las funciones trigonométricas se ajustan mediante regresión de mínimos cuadrados en las coordenadas espaciales como predictores. Este enfoque simple tiene varias deficiencias: pierde detalles debido al poderoso suavizado; inestabilidad causada por valores atípicos o errores de observación o cuando se incluyen suficientes términos en la función para retener los detalles locales; y la variación en una parte de la región afecta el ajuste de la superficie en todas partes.”

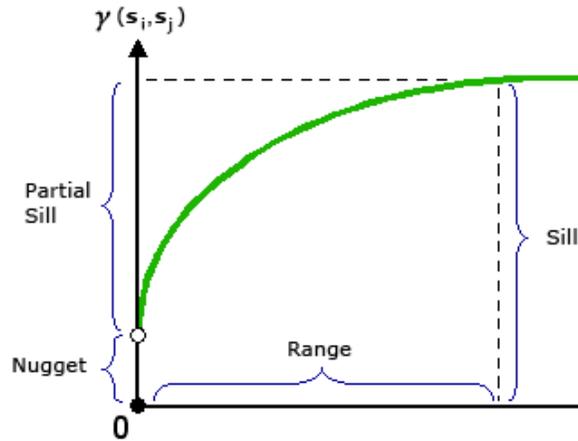
Referente al enfoque local los autores Webster y Oliver (1990), de igual manera indican: “Existen muchas técnicas de interpolación local, como polinomios de bajo orden, funciones de spline, poliedros, triangulación de Delauney, y promedios móviles ponderados. Cada uno de estos métodos tiene sus propias desventajas, pero las siguientes observaciones se aplican a todos los interpoladores tradicionales.”

### **2.4.3. Método del Kriging**

Kriging es un nombre genérico para un conjunto de algoritmos de regresión de mínimos cuadrados generalizado, este método está basado en auto correlacionar de forma espacial las variables logrando genera superficies a partir de puntos discretos. Para determinar la auto correlación se usa el semivariograma mediante el análisis de los datos proporcionados (Murillo, y otros, 2012).

### **2.4.4. Semivariograma**

Los semivariogramas son la herramienta central de la geoestadística, nos permite identificar la naturaleza de la variabilidad espacial de la propiedad en estudio y a entender su comportamiento. Está definido por tres parámetros: rango, sill y nugget (Figura 2) y representa de forma gráfica las coordenadas cartesianas, en el eje de las ordenadas se registra la semivarianza, mientras que por las accisas se representa un vector con modulo igual al intervalo de muestreo, con dirección y sentido de la variable (González, Guerra, & Gómez, 2007).



**Figura 2.** Parámetros del semivariograma

### 2.4.5. Nugget

Es una discontinuidad puntual del semivariograma en el origen. Puede deberse a que la variabilidad espacial tiene una escala más pequeña que la mínima distancia considerada o a un error experimental (Niño, 2008). En los semivariogramas los valores del origen son nulos, pero al tener datos, estos presentan discontinuidad en el origen a esto se le conoce como efecto pepita. Una de las maneras de obtenerlo es trazando en línea recta los primeros puntos del semivariograma hasta que se intercepte con el eje “Y”. Si esta intercepción da valores debajo de cero, su valor asumido será 0, pues los valores negativos no tienen significado. El nugget determina la variabilidad aleatoria y se atribuye a errores de medición de la variable.

### 2.4.6. Sill

Debido a que el semivariograma es una función monótona creciente, ésta alcanza un valor límite denominado meseta y es equivalente a la varianza de la población. Se define también como la cota superior del semivariograma o su límite superior cuando la distancia (h) tiende al infinito (Niño, 2008). Se la obtiene trazando una línea paralela a la abscisa y se ajusta a los puntos de mayor valor del semivariogramas y se lee su valor en la intercepción de esta línea con la ordenada.

#### **2.4.7. Rango**

Determina la zona de influencia en torno a un punto o distancia promedio a la cual las muestras se correlacionan espacialmente, más allá de la cual la autocorrelación es nula. Si el semivariograma no tiende asintóticamente hacia la semivarianza, es decir que no existe una meseta, significa que el rango es superior a la distancia máxima representada (Niño, 2008). Se determina por rango a la distancia para la cual los valores de la variable dejan de estar correlacionados. El rango tiene valores positivos y es obtenido a través de la intercepción de la línea con el eje “Y”.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Fase de campo

##### 3.1.1. Levantamiento perimetral del área de estudio

El área de la investigación se lo realizó en la Finca “La Flor” ubicada en la parroquia La Peaña, perteneciente al Cantón Pasaje, Provincia de El Oro (Figura 3).

Geográficamente ubicada a:

Latitud: 625725

Longitud: 9633525

Datum: WGS 84; Zona 17 Sur



Figura 3. Levantamiento perimetral del área de estudio

Fuente: ARCGIS

### **3.1.2. Clima y ecología**

De acuerdo a los datos proporcionados por la estación meteorológica “Santa Inés” el área de investigación registra datos de temperatura media de 25 °C, 600 mm precipitación media anual, 2.8 promedio de horas luz y humedad relativa del 83%.

### **3.1.3. Materiales, equipos y reactivos utilizados en la investigación**

#### **Materiales**

- Cinta métrica
- Pala
- Barreta
- Funda plástica
- Estilete
- Cilindros metálicos para toma de muestras de suelos
- Etiquetas

#### **Equipos**

- Balanza analítica de 300 gr
- Estufa
- Batidora eléctrica H-4260<sup>a</sup>
- GPS

#### **Reactivos**

- Agua destilada
- Oxalato de sodio

## **3.2. Metodología Fase de campo**

### **3.2.1. Metodología utilizada para la toma de muestras**

- Con un GPS se localiza las coordenadas de los puntos seleccionados al azar dentro de la grilla.
- Una vez ubicados los puntos se limpia el área para tomar las muestras. Se realizan calicatas de 50x50x50 cm y a cada una se le hace una pequeña escalinata a 25 cm.
- Se coloca dos cilindros metálicos sobrepuestos en la primera superficie de 0 a 25 cm, el primer cilindro captará la muestra sin disturbar y el segundo servirá para ayudar a introducirlo en el suelo, de igual manera se repite el mismo procedimiento para la segunda superficie de 25-50 cm en todas las muestras.
- Con una pala se extrajo el cilindro que contiene la muestra y se lo envuelve con un plástico de embalaje para evitar su alteración.
- Se coloca la etiqueta al cilindro que contiene la muestra, cabe recalcar que dentro de la etiqueta debe ir colocado el punto, eje y la profundidad, esto es de gran importancia para su identificación. Situación que se repitió en todos los puntos de muestreo.

## **3.3. Fase de laboratorio**

### **3.3.1. Tamizado de la muestra de suelo**

- Se coloca la muestra sobre un papel para secar al ambiente y se disgrega los terrones.
- Con la ayuda de un rodillo de madera se disgregó el suelo seco.
- Se cierne la muestra usando un tamiz de 2 mm para obtener tierra fina seca al aire (TFSA), se la guardó en un bote de plástico con su etiqueta para su identificación.

### **3.3.2. Método para determinar textura**

- Se pesan 50 g de TFSA tamizado, si el suelo es arenoso pesar 100 g.
- Adicionar 10 ml de oxalato de sodio saturado, agitar con una varilla de vidrio y dejar en reposo por 24 h.

- Transferir la muestra al vaso del agitador y agitar durante 2-5 min.
- Concluida la agitación, pasar la suspensión al cilindro de sedimentación, empleando una piseta para retirar todas las partículas.
- Se agrega agua hasta la línea de aforo.
- Agitar el cilindro hasta conseguir la remoción de todo el suelo sedimentado en el fondo.
- Colocar el cilindro sobre la mesa y lentamente el hidrómetro en suspensión.
- Hacer la primera lectura del hidrómetro a los 40 s de iniciada la sedimentación luego medir la temperatura de la suspensión
- Efectuar una segunda lectura con el hidrómetro a las 7 horas de iniciada la sedimentación, registrando además la temperatura.

Calcular el contenido del limo arcilla en % se estimó con la ecuación (1)

$$(\text{limo} + \text{arcilla}) = \frac{[La_{40s} - ((20 - ta_{40s}) \times 0,35)] - [Lb_{40s} - ((20 - tb_{40}) \times 0,35)]}{m} \times 100 \quad (1)$$

### 3.3.3. Método para determinar la materia orgánica por el método de ignición

- Pesar un crisol limpio y seco.
- Pesar 10 g de TFSA.
- Colocar el crisol en la estufa a 300°C durante 3 horas.
- Sacar el crisol de la estufa y colocar al ambiente para que se enfríe.
- Pesar el crisol con la muestra de suelo sometida a ignición y restar el peso del crisol para establecer la pérdida de peso de la muestra.
- Calcular el porcentaje de materia orgánica (MO)

### 3.3.4. Método para la determinación de la densidad real

- Pesar un balón aforado de 50 ml seco y sin tapa.
- Pesar el balón con agua hasta la línea de aforo
- Poner en el balón 5g de TFSA.
- Agregar agua en el balón hasta la mitad de su capacidad y agitar
- Agregar agua en el balón hasta la línea de aforo.
- Pesar nuevamente el balón con su contenido de agua y muestra de suelo

- Calcular la densidad real asignando los siguientes símbolos a los diferentes pesos

Aplicar la formula señalada a continuación (2):

$$Densidad\ real = \frac{b-a}{(d-a)-(c-b)} \quad (2)$$

Donde:

- a: peso del balón vacío
- b: peso del balón + muestra del suelo
- c: peso del balón + agua + suelo
- d: peso del balón aforado con agua

### 3.4. Análisis estadístico

Se estimó parámetros de tendencia central, dispersión y distribución en el software IBM SPSS STATICS 22 donde permite identificar las variables con mayor dispersión en la finca “La Flor” para lo cual se emplearon gráficas para explorar los datos como el diagrama caja y bigote. También se realizó un análisis multivariado de las propiedades físicas mediante el Análisis de Componentes Principales (ACP), con la finalidad reducir variables y determinar la correlación de las variables más representativas. Las variables consideradas en este método son: Da, Dr, porosidad, arcilla, arena, limo y humedad aprovechable, variables que fueron correlacionadas en la matriz de Pearson.

### 3.5. Análisis geoestadístico

Para análisis geoespacial se utilizó el software Arcmap versión 10.3 (2014), en el cual se cargó la base de datos para la determinación de los semivariogramas experimentales para cada una de las variables analizadas. Se obtuvieron los errores medios cuadrados (Root Mean Square Error- RMSE) de cada variable estimada con la ecuación (3), para la validación de los métodos de interpolación. Éste índice es el más usado para la validación de los modelos. Su resultado tiene las unidades de la variable medida y pondera los pronósticos que están más alejados del valor medido. (Liu, Tian, Chen, & Li, 2010)

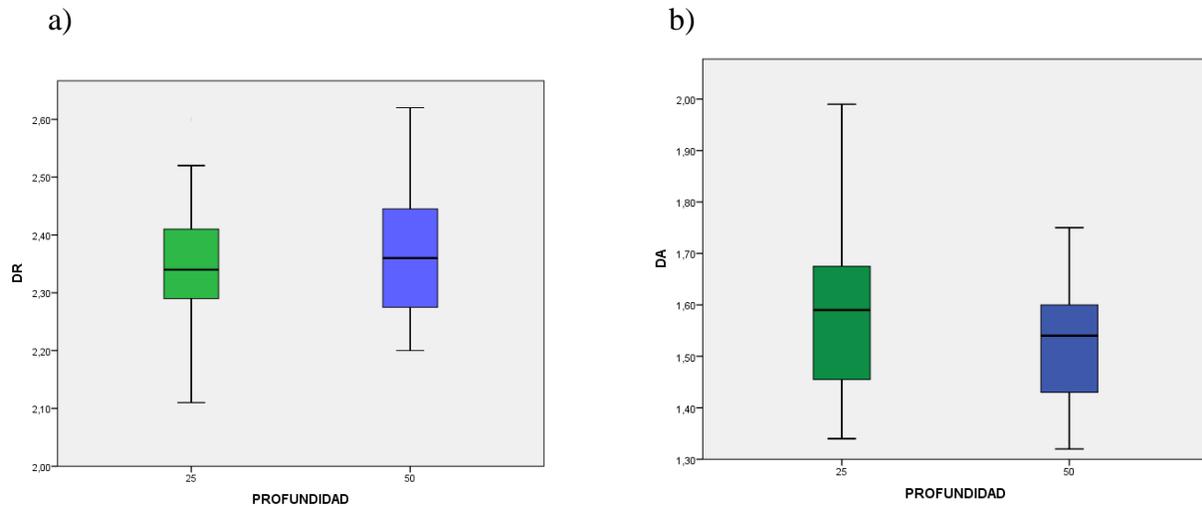
$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_{xi}-M_{xi})^2}{n}} \quad (3)$$

Donde  $P_{xi}$  es la estimación de los valores conocidos de las variables en la ubicación  $x_i$ ,  $M_{xi}$  es el valor predicho medido por el modelo de interpolación en la ubicación  $x_i$  y,  $n$  es el número de muestras.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Análisis descriptivo de las propiedades físicas del suelo

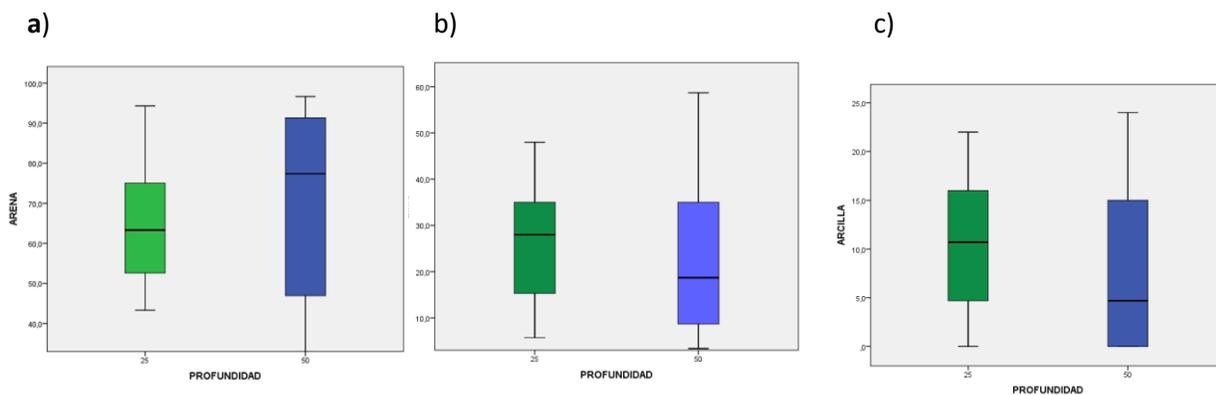
Los valores de  $D_r$  presentados en la figura 4, no se encontraron valores atípicos y la mayor dispersión de los datos se encuentra en la profundidad de 25-50 cm en el rango 2,30 a 2,60 g/cm<sup>3</sup>, valores inferiores a los encontrados entre 0-25 cm (rango: 2,10-2,55 g/cm<sup>3</sup>), pero las medianas son muy semejantes (2,30-2,35 g/cm<sup>3</sup>). (Ramirez, 1997) indica, que los valores de  $D_r$  se encuentra entre 2,5 y 2,6 g/cm<sup>3</sup> y obtiene un valor mayor en suelos de contenido arcilloso o arenosos con poca materia orgánica. En esta investigación los valores están en un rango adecuado. En el caso de la  $D_a$  los rangos variaron entre 1,35-2 g/cm<sup>3</sup> en el primer estrato y entre 1,32 a 1,75 g/cm<sup>3</sup> en el segundo estrato, con diferencias en la mediana la cual fue mayor en el primer horizonte (1,58 g/cm<sup>3</sup>) y disminuyó a media que se profundiza en el perfil (1,55 g/cm<sup>3</sup>).



**Figura 4.** Diagrama de caja y bigotes por estratos: a)  $D_r$ , b)  $D_a$

La figura 5 indica una superioridad de los valores de arena en primer (45-96%) y segundo horizonte (50-96%), la mediana se ubicó en 65% y 80%, respectivamente. El limo (figura 6b) osciló entre 5 a 50 % entre 0-25 cm, mientras en el segundo horizonte el valor máximo aumento a 60 %. Mientras que en arcilla (figura 6c) los valores máximos no sobrepasaron el 25%. Resultados que indican que las clases texturales fueran arenosas y franco arenoso limoso en el primer y segundo horizonte muestreado, respectivamente.

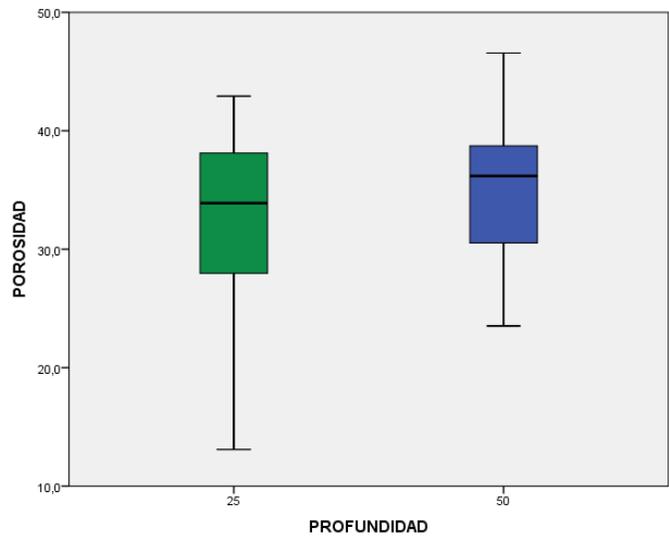
En la investigación estas variaciones texturales se asocian con el fenómeno de deposición de los materiales aluviales, donde los suelos cercanos a los cauces son de textura gruesa y los más alejados son de textura más fina Arias et al (2010).



**Figura 5.** Diagrama de caja y bigote de porcentaje de arena, limo y arcilla a 2 profundidades de estudio

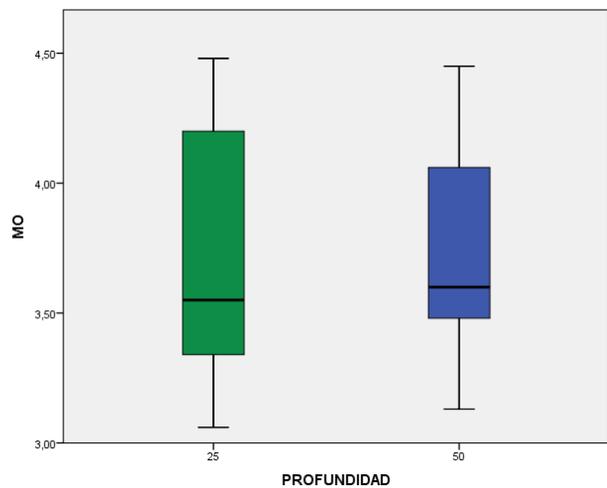
En la figura 6 muestra los valores de la porosidad del suelo, los cuales variaron en rangos de 14 a 43 % en el primer horizonte y valores superiores a los encontrados (rango: 24-46 %) en el segundo horizonte, la mediana se ubicó en 34 y 37% aumentando en el segundo estrato.

En esta investigación el suelo de la finca tiene una gran actividad agrícola y gracias al aporte continuo de las plantas de banano para generar MO contribuye a que aumente la porosidad. De acuerdo con Andrade, Da Silva y Kato (2008) la porosidad es una de las propiedades que caracteriza la Ha del suelo porque el aumento de la porosidad incrementa la humedad aprovechable junto a la MO permitiendo el movimiento del agua y los nutrientes al interior del suelo.



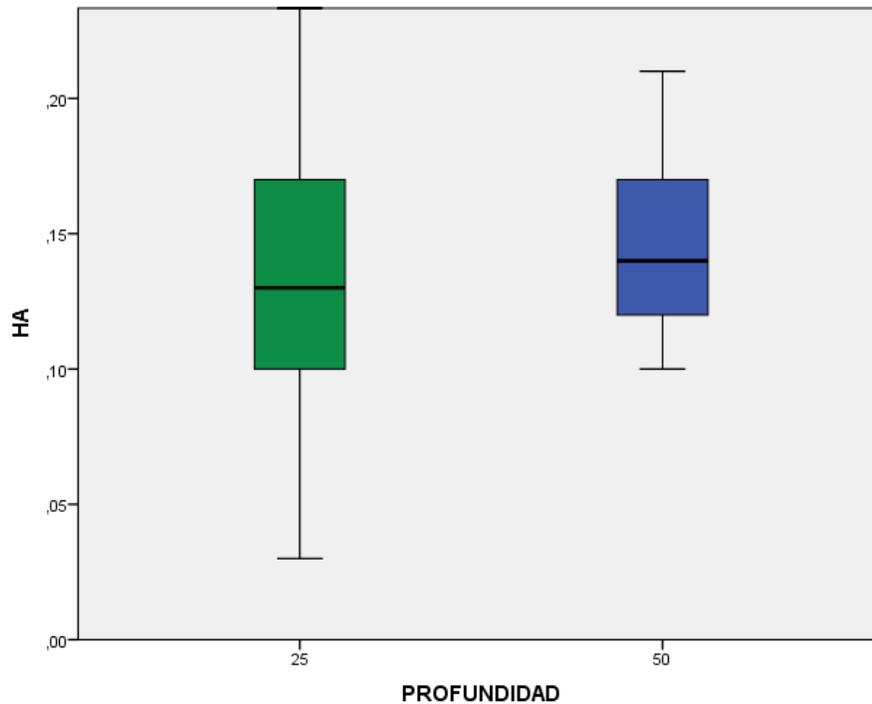
**Figura 6.** Diagrama de caja y bigote de porcentaje de porosidad a 2 profundidades de estudio

La figura 7 muestra los valores de MO del suelo con un rango de 3 a 4,5 % en la profundidad de 0-25 cm, siendo similares las medianas con el registro de la profundidad 2 (3,55 %). Garrido (1994) indica que los niveles de MO disminuyen en el perfil a medida que se profundiza el muestreo, pero en esta investigación los valores son muy semejantes. Efecto que puede estar relacionado a la descomposición de las hojas que de forma continua aporta las plantas de banano.



**Figura 7.** Diagrama de caja y bigote de porcentaje de MO a 2 profundidades de estudio

En la figura 8 muestra los valores de la humedad aprovechable (HA) del suelo, los cuales variaron en rangos de 3 a 25 % en el primer horizonte y rango 10- 22 % en el segundo horizonte, siendo muy similares en sus medianas aumentando en el segundo estrato.



**Figura 8.** Diagrama de caja y bigote de porcentaje de HA a 2 profundidades de estudio

En la Tabla 2 se resume la estadística descriptiva de las muestras obtenidas en profundidades (0-25cm) (25-50cm), siendo los valores para densidad real entre 2,11 a 2,62g/cm<sup>3</sup> y se desvían en la media 2,350 g/cm<sup>3</sup>, para Da los valores se desvían en la media 1,55 g/cm<sup>3</sup> obteniendo un valor máximo para de 1,99g/cm<sup>3</sup>. Siendo la fracción arena la que se encuentra en la mayoría de los puntos, obtiene un valor máximo 96,6 % dentro de la finca, seguido de la fracción el limo con un valor de 3,3 a 58,7% y las arcillas con un valor de 0 a 24% ocupando el menor porcentaje., la porosidad obtuvo valores que oscilan de 13,100 y 46,5 % y se desvían en la media 35,59%, los valores para HA son de 0,030 a 0,270cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup> obteniendo una desviación de la media en 0,135 cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>.

**Tabla 2.** Estadística descriptiva de las propiedades físicas del suelo

Variable	Promedio	Me	S	CV %	Min	Max	Rango	Sesgo	Curtosis
Dr g/cm <sup>3</sup>	2,354	2,350	0,105	4,466	2,110	2,620	0,510	0,258	0,040
Da g/cm <sup>3</sup>	1,553	1,550	0,139	8,940	1,320	1,990	0,670	0,481	0,372
MO %	3,730	3,575	0,412	11,058	3,060	4,480	1,420	0,283	-1,309
Limo %	23,958	24,350	14,288	59,635	3,350	58,700	55,350	0,361	-0,634
Acilla %	8,936	8,000	7,759	86,831	0,000	24,000	24,000	0,381	-1,230
Arena %	67,106	64,950	19,877	29,620	32,700	96,650	63,950	-0,078	-1,236
Pt %	33,878	35,595	6,811	20,104	13,100	46,560	33,460	-0,906	0,805
HA cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	0,144	0,135	0,047	32,279	0,030	0,270	0,240	0,523	0,471

#### 4.2. Análisis multivariado

Se realiza el análisis de correlación de Pearson (Tabla 3) donde se obtuvo correlación fuerte negativa entre la DA y variables como la MO (-0,754), porosidad del suelo (-0,897) y la Humedad aprovechable (-0,835) lo cual indica que a medida que la DA aumente la MO, la porosidad y la humedad aprovechable disminuye y viceversa, afirmando los estudios de Haddad (2003) donde asegura que cuando la densidad aparente del suelo aumenta, se incrementa la compactación y se afectan las condiciones de retención de humedad. La Humedad aprovechable correlacionada con las variables MO y porosidad presentan una correlación positiva de (0,789) y (0,824), indicando que a medida que la humedad aprovechable aumente la MO y la porosidad del suelo también incrementarían mientras que, correlacionando la Humedad aprovechable con la arena, la correlación es fuerte negativa (-0,742) esto quiere decir que al aumentar la Humedad aprovechable el porcentaje de arena disminuye. La variable arena correlacionada con limo y arcilla presentan

una correlación fuerte negativa de (-0,949) (-0,814) lo cual indica que al aumentar la arena disminuye el limo y la arcilla y viceversa.

La DA es afectada por el espacio poroso y la textura Dick (2004), el cual a su vez está determinado por la MO del suelo Stine y Weill (2002), a medida que aumente la MO y el espacio poroso, disminuye la DA y viceversa.

	<b>Dr</b> g/cm <sup>3</sup>	<b>Da</b> g/cm <sup>3</sup>	<b>MO %</b>	<b>Limo %</b>	<b>Acilla %</b>	<b>Arena</b> %	<b>Pt %</b>	<b>HA</b> cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>
<b>Dr g/cm<sup>3</sup></b>	1							
<b>Da g/cm<sup>3</sup></b>	-0,026 0,850	1						
<b>MO %</b>	0,150 0,279	-0,754** 0,021	1					
<b>Limo %</b>	-0,166 0,231	-0,150 0,281	0,199 0,148	1				
<b>Acilla %</b>	-0,037 0,788	-0,119 0,393	0,047 0,735	0,590** 0,000	1			
<b>Arena %</b>	0,134 0,335	0,154 0,267	-0,162 0,243	-0,949** 0,000	-0,814** 0,000	1		
<b>Pt %</b>	0,463** 0,000	-0,897** 0,000	0,157 0,257	0,057 0,682	0,081 0,559	-0,073 0,601	1	
<b>HA</b> <b>cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup></b>	0,042 0,764	-0,835** 0,013	0,789 0,002	-0,103 0,459	-0,172 0,213	-0,742** 0,010	0,824 0,006	1

**Tabla 3.** Matriz de Correlación de Pearson de las propiedades físicas del suelo

El análisis de componente principales (CP) (Tabla 4) indica 73,12 % de la varianza total. Esto conformó 3 CP, donde el primer CP representa el 33,189 % y los mayores autovectores son arena (-0,983, limo 80,914) y arcilla (0,833). La porosidad (0,986) y la Da (-0,911) y la MO (0,746) y HA (0,749) son los valores de mayor peso en los CP 2 y 3 respectivamente.

**Tabla 4.** Análisis de componentes principales

<b>VARIANZA TOTAL</b>	33,183	58,403	73,116
	<b>COMPONENTES</b>		
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
<b>ARENA</b>	-0,983		
<b>LIMO</b>	0,914		
<b>ARCILLA</b>	0,833		
<b>POROSIDAD</b>		0,986	0,131
<b>DA</b>	-0,17	-0,911	0,109
<b>MO</b>	0,108	0,112	0,746
<b>HA</b>	-0,178	0,175	0,749
<b>DR</b>	-0,293	0,407	0,518

#### 4.3. Análisis de la variabilidad espacial de suelos

En la Tabla 5, se presentan los resultados del análisis estructural de las variables en estudio para la determinación de semivariogramas experimentales donde se ajustó modelos teóricos para los estratos considerados en el perfil, para cada variable, siendo más precisos y eficientes los modelos esférico y gaussiano ya que presentaron un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) cercano o igual a 1, así mismo se obtuvieron los valores más bajo del error medio cuadrático (RMSE). Los resultados revelan la existencia de variabilidad espacial, se determinó una dependencia débil para Da y MO en el perfil 25-50cm en el primer punto de muestreo. En el segundo se observa una dependencia moderada en el estrato 0-25cm para limo, arcilla y pH y a partir de 25-50cm en Da, arena y arcilla. Por el contrario, solo se determinó para ambos estratos 0-25 y 25-50cm dependencia moderada para HA en el tercer punto de muestreo. El rango de los modelos de los semivariogramas muestra presencia de estructura espacial más allá de los 12m. Los rangos que explican la existencia de una dependencia espacial se encuentran entre 12,2 a 18 m.

**Tabla 5:** Parámetros del semivariograma aplicando kriging ordinario para las variables en estudio.

Prof. (cm)	Var.	modelo	Nugget	Sill	Rango	R2	RMSE	De	
<b>0-25</b>	Dr	Gaussiano	0,5	0,86	12,2	1000	0.144	58,14	Moderada
	Da	Gaussiano	0,52	0,85	12,2	0.996	0.146	61,18	Moderada
	Arena	Gaussiano	0	1,52	16,8	0.999	0.005	0,00	Fuerte
	Limo	Esférico	0	1,3	16,8	1000	0.006	0,00	Fuerte
	Arcilla	Gaussiano	0,4	1,14	12,2	0.994	0.138	35,09	Moderada
	Pt	Esférico	0,2	1,31	12,2	1000	0.112	15,27	Fuerte
	MO	Gaussiano	0,58	0,84	12,2	0.999	0.152	69,05	Moderada
	Ph	Gaussiano	0	2,6	12,2	1000	0.006	0,00	Fuerte
	CE	Gaussiano	0,5	0,79	12,2	0.999	0.144	63,29	Moderada
HA	Esférico	0,25	0,91	18	1.000	0.113	27,47	Moderada	
<b>25-50</b>	Dr	Gaussiano	0	1,7	12,2	0.999	0.04	0,00	Fuerte
	Da	Gaussiano	0,6	0,74	12,2	1.000	0.162	81,08	Debil
	Arena	Esférico	0,39	0,99	12,2	0.999	0.142	39,39	Moderada
	Limo	Esférico	0,4	0,76	12,2	1.000	0.239	52,63	Moderada
	Arcilla	Esférico	0	1,68	12,2	0.999	0.05	0,00	Fuerte
	Pt	Esférico	0	1,72	12,2	1.000	0.032	0,00	Fuerte
	MO	Gaussiano	0,57	0,63	12,2	0.998	0.153	90,48	Debil
	Ph	Gaussiano	0,4	1,02	12,2	0.984	0.135	39,22	Moderada
	CE	Gaussiano	0,5	0,84	12,2	1.000	0.142	59,52	Moderada
HA	Esférico	0	1,89	12,2	0.996	0.06	0,00	Fuerte	

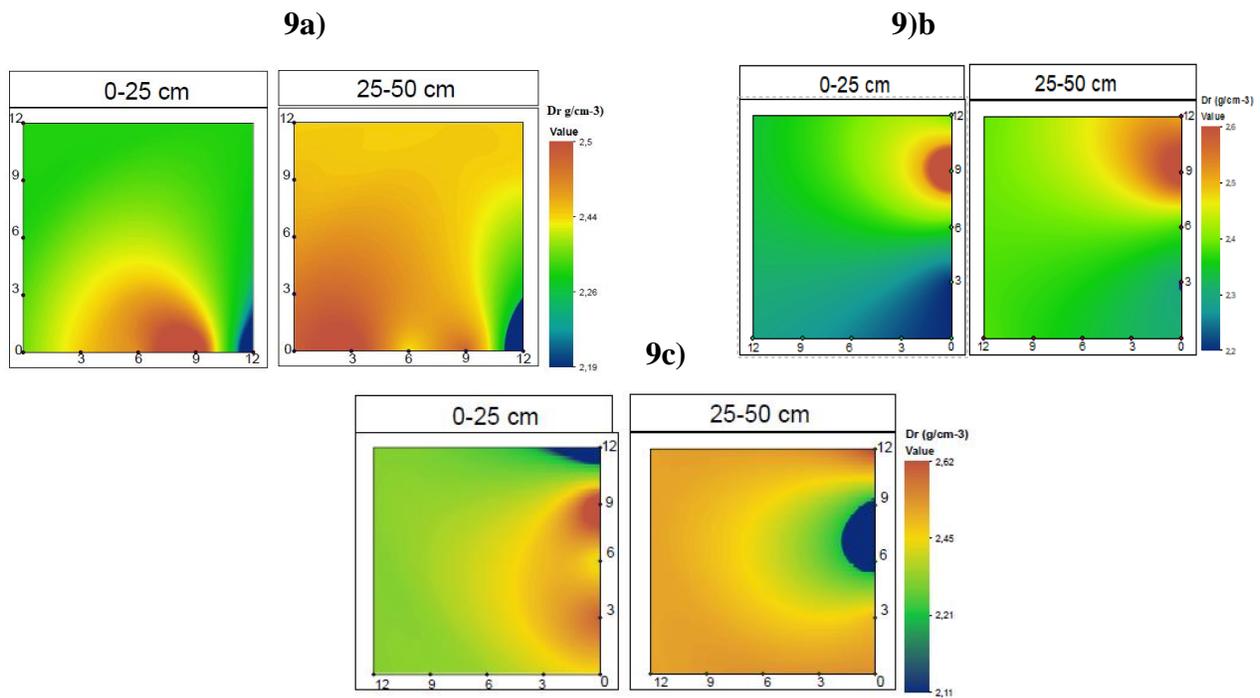
Prof. (cm)	Var.	modelo	Nugget	Sill	Rango	R2	RMSE	De	
<b>0-25</b>	Dr	Esférico	0,29	1,22	16,8	0.995	0.119	23,8	Fuerte
	Da	Esférico	0	1,83	12,2	0.997	0.036	0,0	Fuerte
	Arena	Esférico	0	1,6	12,2	1.000	0.055	0,0	Fuerte
	Limo	Esférico	0,37	1,2	18	0.996	0.121	30,8	Moderada
	Arcilla	Esférico	0,74	1,16	18	0.999	0.153	63,8	Moderada
	Pt	Esférico	0	1,89	12,2	1.000	0.002	0,0	Fuerte
	MO	Esférico	0	1,63	12,2	0.994	0.239	0,0	Fuerte
	Ph	Esférico	0,35	1,08	16,8	1.000	0.120	32,4	Moderada
	CE	Esférico	0	1,6	12,2	0.999	0.032	0,0	Fuerte
HA	Esférico	0	1,7	12,2	1.000	0.023	0,0	Fuerte	
<b>25-50</b>	Dr	Esférico	0	1,41	16,8	0.999	0.035	0,0	Fuerte
	Da	Esférico	0,36	1,15	16,8	1.000	0.121	31,3	Moderada
	Arena	Esférico	0,2	0,58	16,8	0.999	0.112	34,5	Moderada
	Limo	Esférico	0,43	1,05	13,9	1.000	0.138	41,0	Moderada
	Arcilla	Esférico	0	0,82	16,8	0.999	0.022	23,2	Fuerte
	Pt	Esférico	0	1,68	12,2	1.000	0.036	0,0	Fuerte
	MO	Esférico	0,2	1,22	12,2	0.998	0.110	16,4	Fuerte
	Ph	Esférico	0	1,62	12,2	0.996	0.004	0,0	Fuerte
	CE	Esférico	0	1,3	12,2	1.000	0.042	0,0	Fuerte
HA	Esférico	0	1,69	12,2	0.996	0.002	0,0	Fuerte	

Prof. (cm)	Var.	modelo	Nugget	Sill	Rango	R2	RMSE	De	
0-25	Dr	Esférico	0	1,66	12,2	0,998	0,053	0,0	Fuerte
	Da	Esférico	0	1,82	12,2	0,999	0,042	0,0	Fuerte
	Arena	Esférico	0	1,69	12,2	0,999	0,035	0,0	Fuerte
	Limo	Esférico	0	1,76	12,2	0,999	0,006	0,0	Fuerte
	Arcilla	Esférico	0	1,95	12,2	0,998	0,06	0,0	Fuerte
	Pt	Esférico	0	1,83	12,2	0,997	0,025	0,0	Fuerte
	MO	Esférico	0	1,78	12,2	0,995	0,022	0,0	Fuerte
	Ph	Esférico	0	1,88	12,2	0,997	0,036	0,0	Fuerte
	CE	Esférico	0	1,95	12,2	1,000	0,055	0,0	Fuerte
HA	Esférico	0,4	0,75	12,2	0,996	0,132	53,3	Moderada	
25-50	Dr	Esférico	0	1,73	12,2	0,999	0,042	0,0	Fuerte
	Da	Esférico	0	1,87	12,2	1,000	0,002	0,0	Fuerte
	Arena	Esférico	0,16	1,38	14,7	0,994	0,105	11,6	Fuerte
	Limo	Esférico	0,28	1,52	18	1,000	0,116	18,4	Fuerte
	Arcilla	Esférico	0	1,49	12,2	0,999	0,032	0,0	Fuerte
	Pt	Esférico	0	1,87	12,2	1,000	0,023	0,0	Fuerte
	MO	Esférico	0	1,69	12,2	0,998	0,035	0,0	Fuerte
	Ph	Esférico	0	1,66	12,2	0,999	0,011	0,0	Fuerte
	CE	Esférico	0	1,95	12,2	1,000	0,001	0,0	Fuerte
HA	Esférico	0,5	0,84	12,2	0,996	0,144	59,5	Moderada	

Se presentan mapas de variabilidad espacial de la densidad real Dr. (Figura 9) los cuales presentaron alcances de 12,23 m, 16,8 m, y 12,22 m, por cada una de las zonas de muestreo respectivamente. En la figura **9a** se puede observar variabilidad en el perfil 0-25cm de 0m a 12m(x) cuyos valores oscilan entre 2,19 a 2,5 g/cm<sup>-3</sup> y de 0m a 12m(y) presenta homogeneidad con valores de 2,26 g/cm<sup>-3</sup>. En el perfil 25-50cm se presenta variabilidad desde los 0m a 12m(x) con valores alrededor de 2,19 a 2,5 g/cm<sup>-3</sup> y de 0m a 12m(y) se observa una variabilidad alrededor de 2,44 a 2,5 g/cm<sup>-3</sup>. La figura **9b** presenta en el perfil 0-25cm variabilidad de 0m a 12m(x) con valores alrededor de 2,2 a 2,3 g/cm<sup>-3</sup> y de 0m a 12m(y) con valores que oscilan entre 2,2 a 2,6 g/cm<sup>-3</sup>.

Mientras que en el perfil 25-50 para las distancias de 0m a 12m (x) fluctúan valores de 2,3 a 2,4 g/cm<sup>-3</sup> y desde 0m a 12m(y) la variabilidad se presenta con valores de 2,3 a 2,6 g/cm<sup>-3</sup>. En la figura **9c** en el perfil 0-25cm hay variabilidad de 2,21 a 2,45 g/cm<sup>-3</sup> en las distancias de 0m a 12m(x) y desde 0m a 12m(y) con valores alrededor de 2,11 a 2,62 g/cm<sup>-3</sup>. En el perfil de 25-50cm se observa una mayor variabilidad desde 0m a 12m(y) cuyos valores oscilan entre 2,11 a 2,62 g/cm<sup>-3</sup> pero se observa una pequeña concentración del 2,62 g/cm<sup>-3</sup> a los 12m(y), mientras que de 0m a 12m(x) mantiene la homogeneidad con valores de 2,45 g/cm<sup>-3</sup>. El CV obtenido en el análisis uni y multivariado para DR presento la variación más baja y de acuerdo a estudios realizados por (Cucunuba, Alvarez, & Camacho, 2011) y (Guatibonza, 2009) concluye que el CV es bajo porque

la  $D_r$  tiene una relación directa con la génesis del suelo e influye en la variabilidad del suelo. En la profundidad 25-50 cm ocurre una gran concentración cuyos valores van de 2,44 a 2,62  $\text{g/cm}^{-3}$  siendo la densidad real homogénea. Resultados descritos por (Monroy-Rodríguez, 2017) indican que la distribución de la  $D_r$  es normal en valores que oscilan entre 2,50 y 2,53  $\text{g/cm}^{-3}$  y si la densidad real es inferior a 2,65  $\text{gr/cm}^3$ , podemos pensar que el suelo posee un alto contenido de yeso o de materia orgánica. (Heredia, 2013).

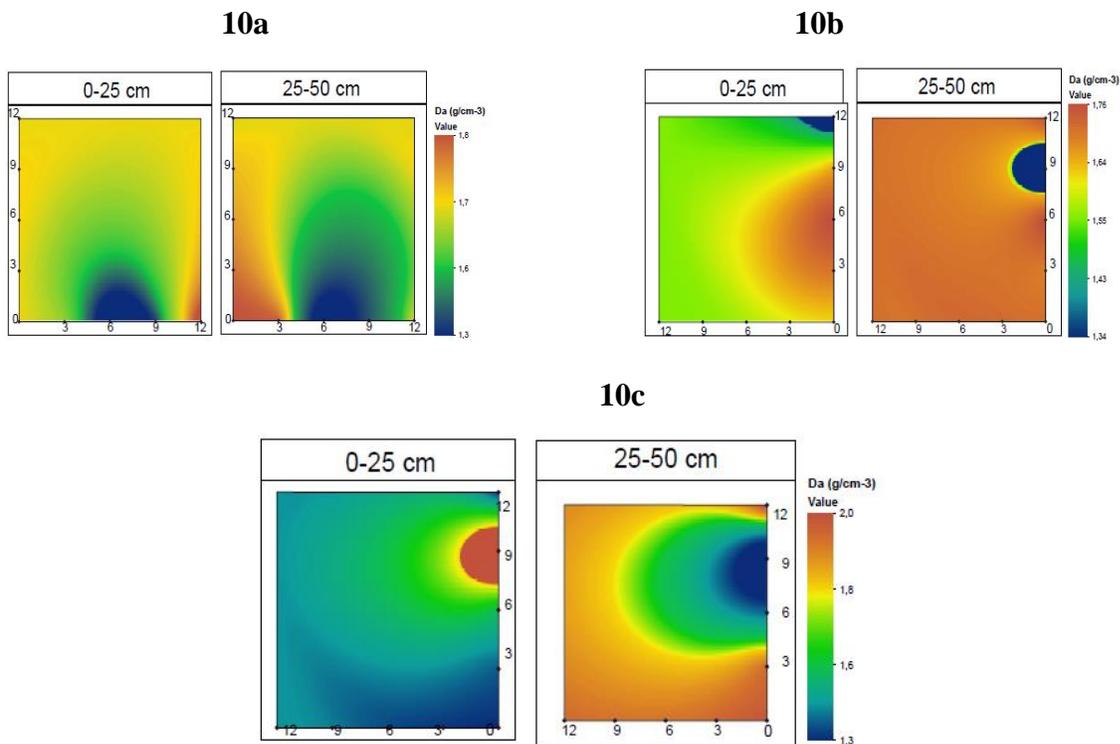


**Figura 9.** Distribución espacial de  $D_r$  a 25 cm y 50 cm de profundidad.

En la figura 10 se presenta los mapas de la variabilidad del porcentaje de densidad aparente ( $D_a$ ) a diferentes profundidades obtenidos mediante el kriging ordinario los cuales presentaron alcance 12,2m; 16,8m y 12,2m para cada zona de muestreo. En la figura **10a** en el perfil 0-25 cm se observa variabilidad desde 0m a 12m(x) cuyos valores para  $D_a$  van de 1,3 a 1,8  $\text{g/cm}^{-3}$ . En el perfil 25-50 presentan una mayor variabilidad desde 0m a 3m(x) y 0m a 9m(y) cuyos valores oscilan entre 1,7 a 1,8  $\text{g/cm}^{-3}$ . En la figura **10b** en el perfil 0-25 cm se observa variabilidad desde 0m a 12m(y) cuyos valores para  $D_a$  van de 1,3 a 2,0  $\text{g/cm}^{-3}$  siendo el valor mínimo de 1,3 a 1,6

$\text{g/cm}^{-3}$  el que se encuentra más distribuido que valores máximos de 1,8 a  $2,0 \text{ g/cm}^{-3}$ , mientras que en el perfil 25-50 predomina el valor máximo de 1,8 a  $2,0 \text{ g/cm}^{-3}$  a los valores mínimos de 1,3 a  $1,6 \text{ g/cm}^{-3}$ . En la figura **10c** en el perfil 0-25 cm se observa variabilidad desde 0m a 12m(x) cuyos valores para  $D_a$  van de 1,55 a  $1,64 \text{ g/cm}^{-3}$  y 1,34 a  $1,76 \text{ g/cm}^{-3}$  desde 0m a 12m(y), mientras que en el perfil 25-50 predomina el valor máximo de 1,64 a  $1,76 \text{ g/cm}^{-3}$  y una leve concentración los valores mínimos de 1,34 a  $1,55 \text{ g/cm}^{-3}$ . Estudios realizados por Dercourt y Paquet (1984) afirman que la densidad aparente en la profundidad es mayor debido a que el suelo está más compactado. En la mayoría de los perfiles se observa valores de  $D_a$  para texturas arenosas de 1,3 a  $1,7 \text{ g/cm}^{-3}$ .

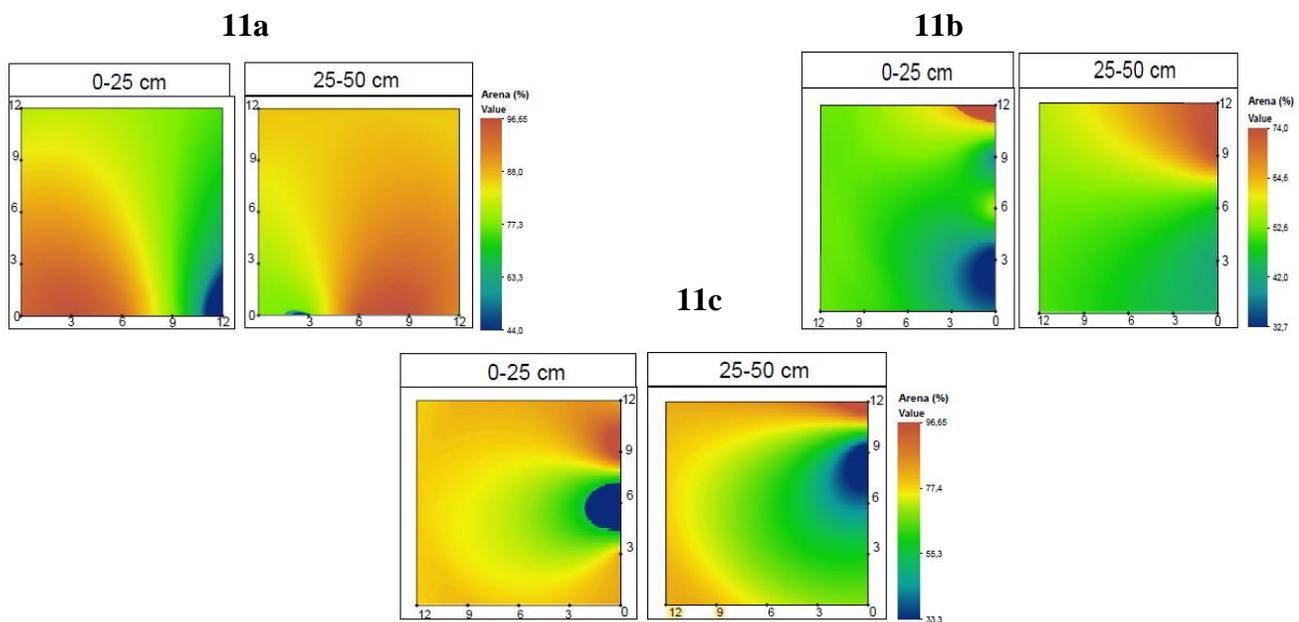
De acuerdo con Donoso (1992) los suelos arenosos tienden a tener densidades mayores entre  $1,4 - 1,7 \text{ g/cm}^{-3}$ , por lo tanto no presenta las características ideales para el desarrollo óptimo del cultivo porque obstruye el crecimiento de raíces, la aireación del suelo y dificulta la retención del agua afectando a la producción agrícola.



**Figura 10.** Distribución espacial de  $D_a$  a 25 cm y 50 cm de profundidad.

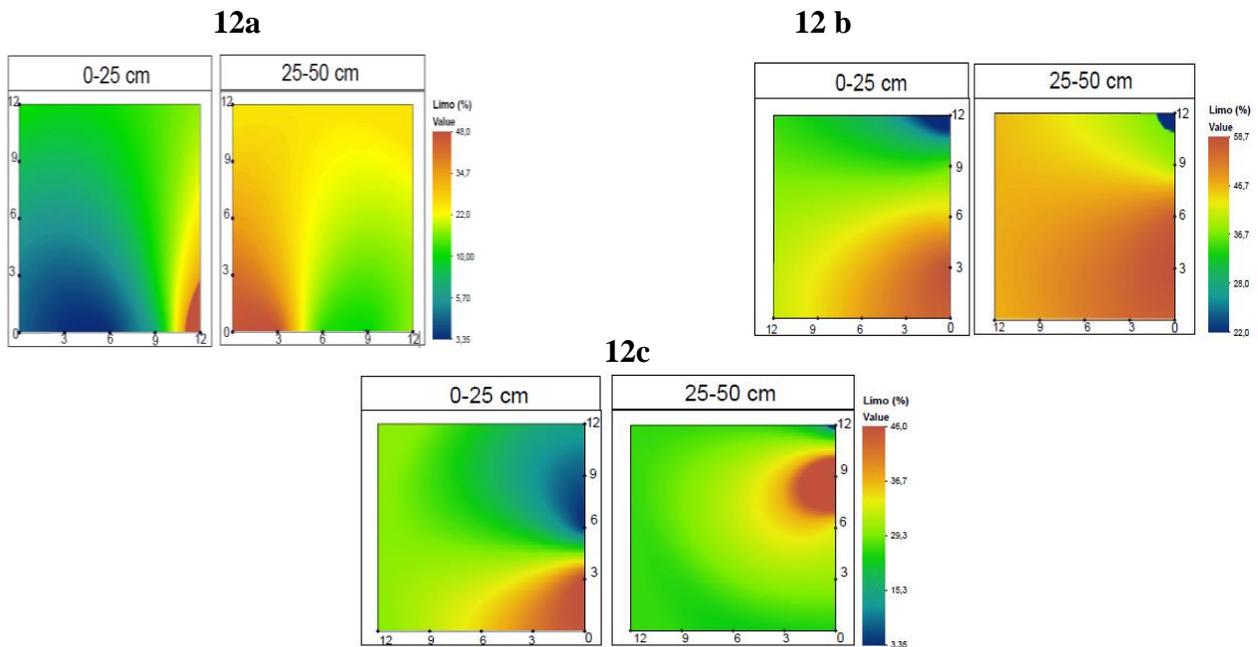
Se presentan mapas de variabilidad espacial de la fracción arena (figura 11), los cuales presentaron alcances de 12,22 m a 16,8m para cada una de las zonas de muestreo respectivamente.

En la figura **11a** en el perfil 0-25cm se observa variabilidad desde 0m a 9m(x) cuyos valores oscilan entre 88,0 a 96,65% y de 9m a 12m(x) de 44,0 a 77,3%, mientras que desde 0m a 9m(y) los valores fluctúan entre 88,0 a 96,65% y de 9m a 12m(y) de 77,3 a 88,0%. En el perfil 25-50cm desde 0m a 3m(x) dispone variabilidad con valores de 44,0 a 77,3% y de 3m a 12m(x) entre 77,3 y 96,65%. En cambio, desde 0m a 3m(y) se mantiene homogeneidad con valores de 77,3 y desde 3m a 12m(y) presenta variabilidad de 77,3 al 88,0%. En la figura **11b** en el perfil 0-25 cm se observa variabilidad desde 0m a 3m(x) cuyos valores fluctúan de 32,7 a 42,0% y a partir de 3m a 12m(x) con valores de 42,0 a 52,6%, mientras que desde 0m a 12 m(y) presenta valores de 32,7% al 74,0%. En el perfil 25-50cm presenta variabilidad de 0m a 3m(x) con valores de 42,0% y de 3m a 12m(x) con valores de 42,0 a 52,6% por el contrario de 0m a 12m(y) establece valores para variabilidad de 42,0 a 74,0%. En la figura **11c** en el perfil 0-25 cm se observa homogeneidad desde 0m a 12m(x) con valores para arena de 77,4% y variabilidad a partir de 3m a 12m(y) con valores de 33,3 a 96,65%. En cambio, en el perfil 25-50 de 0m a 6m(x) predomina el valor de 55,3% y de 6m a 12m(x) fluctúan valores de 77,4% pero se exhibe una mayor variabilidad desde 0m a 12m(y) con valores que varían de 33,3 a 96,65%. En la investigación se aprecia valores altos del 64,6 al 96,65% presentes en los perfiles de 0-50 cm en cada uno de los puntos del muestreo. Jimenez & Siavosh, (2005) indican que los porcentajes altos de arena presentan una baja capacidad de retención de humedad, baja retención de nutrientes, drenaje alto, baja capacidad de suministro de agua, excesiva aireación, lo cual afecta al desarrollo del cultivo.



**Figura 11.** Distribución espacial de la textura arena a 25 cm y 50 cm de profundidad

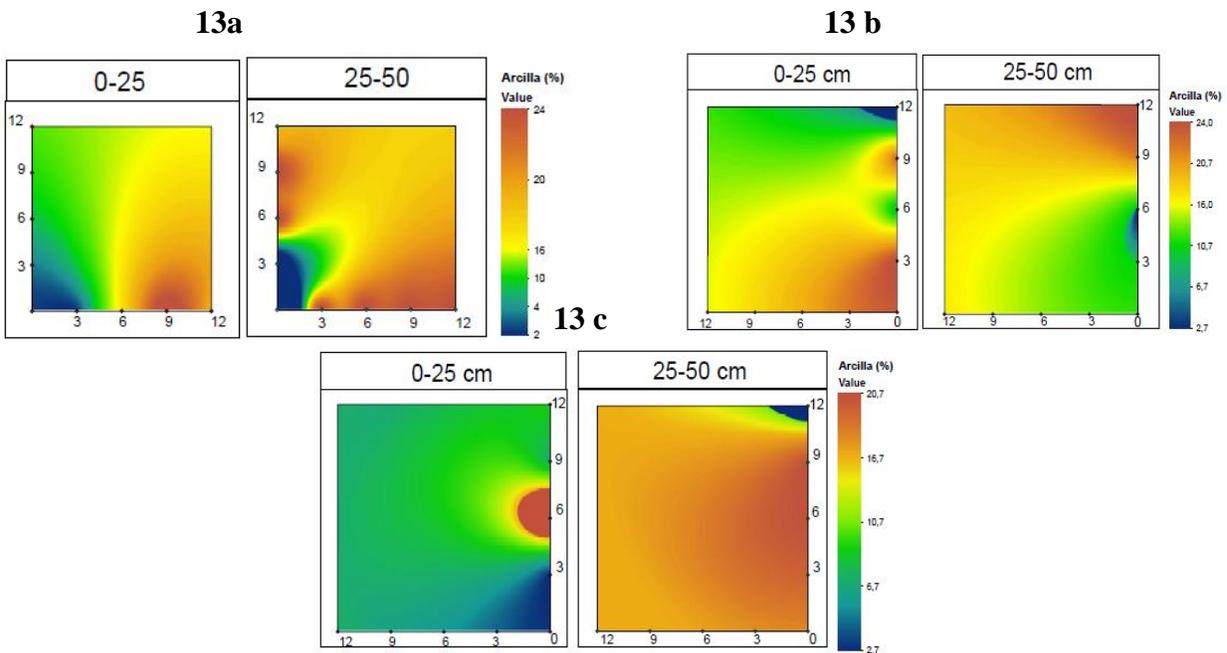
En la figura 12 se presenta los mapas de la variabilidad del porcentaje de limo a diferentes profundidades obtenidos mediante el kriging ordinario los cuales presentaron alcance 12,2m; 16,8m y 18,0m para cada zona de muestreo. En la figura **12a** se observa variabilidad en el perfil 0-25cm de 0m a 12m(x) cuyos valores oscilan entre 3,35 a 48,0% y de 0m a 12m (y) presenta valores de 3,35 a 10,0%. En el perfil 25-50cm la variabilidad se establece desde los 0m a 12m(x) con valores alrededor de 10,0 a 48,0%, en cambio de 0m a 12m(y) varían entre 22,0 a 48,0%. La figura **12b** revela en el perfil 0-25cm variabilidad de 0m a 12m(x) con valores en torno de 46,7 a 58,7% y de 0m a 12m(y) entre 22,0 a 58,7%, mientras que en el perfil 25-50 se registra variabilidad desde 0m a 12m(x) de 46,7 a 58,7% y a partir de 0m a 12m(y) con valores de 22,0 a 58,7%. En la figura **12c** en el perfil 0-25cm hay variación del 29,3 a 46,0% en las distancias de 0m a 12m(x) y desde 0m a 12m(y) con valores aproximadamente de 3,35 a 46,0%. En cambio, en el perfil de 25-50cm se observa una mayor variabilidad desde 0m a 12m(y) cuyos valores oscilan entre 29,3 a 46,0% pero se observa una pequeña concentración del 3,35% a los 12m(y), por el contrario de 0m a 12m(x) se mantiene la homogeneidad con valores de 29,3%. Se observa en los perfiles suelos que contienen mayores proporciones de limo, lo cual indica Delgado (2017) que presentan buenas condiciones para la actividad agrícola.



**Figura 12.** Distribución espacial del limo a 25 cm y 50 cm de profundidad

Se presentan mapas de variabilidad espacial de la fracción arcilla Figura 13, los cuales presentaron alcances de 12,22 m a 18m para cada una de las zonas de muestreo respectivamente.

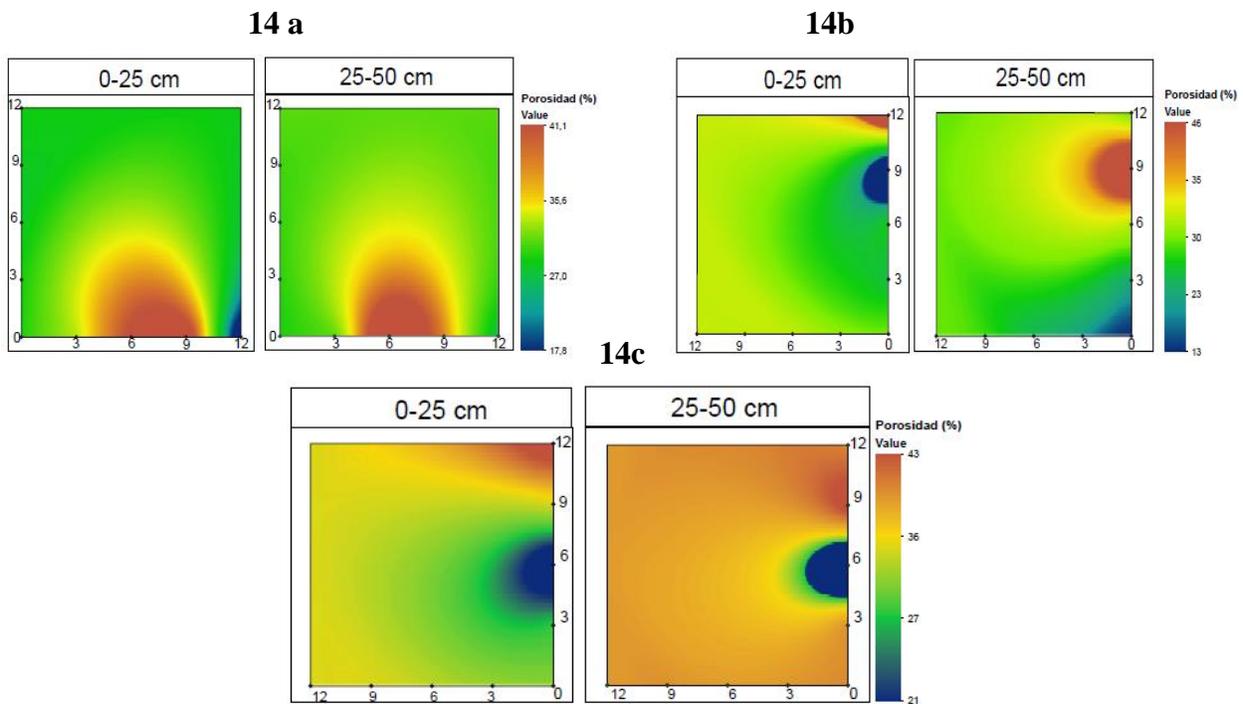
En la figura **13a** se expresa variabilidad en el perfil 0-25cm de 0m a 12m (x) cuyos valores oscilan entre 2 a 24% y de 0m a 12m(y) varía de 2 al 10%. En el perfil 25-50cm se muestra variación desde los 0m a 3m(x) del 2 al 24% y 0 a 3m(y) con valores de 2 al 10%. La figura **13b** manifiesta en el perfil 0-25cm variabilidad de 0m a 12m (x) alrededor del 16,0 al 24,0% y de 0m a 12m(y)se observa valores de 2,7 a 24%, mientras que en el perfil 25-50cm se expone variabilidad desde 0m a 12m(x) con valores de 10,7 al 16% y de 0m a 12m (y) del 2,7 al 24,0%. En la figura **13c** se aprecia variación en el perfil 0-25cm de 2,7 a 6,7% en las distancias de 0m a 12m(x) y de 2,7 a 20,7% para 0m a 12m(y), en cambio en el perfil de 25-50cm desde 0m a 12m(x) se aprecia una variación del 16,7 al 20,7% y de 0m a 12m(y) presenta valores entre 2,7 a 20,7%.



**Figura 13.** Distribución espacial de la arcilla a 25 cm y 50 cm de profundidad.

En la figura 14 se presenta los mapas de variabilidad del porcentaje de porosidad a diferentes profundidades obtenidos mediante el kriging ordinario, los cuales presentaron alcance de 12,2m para cada zona de muestreo. En la figura **14a** se expone variabilidad en el perfil 0-25cm desde 0m a 12m (x) cuyos valores oscilan entre 17,8 a 41,1%, en cambio de 0m a 12m(y) se

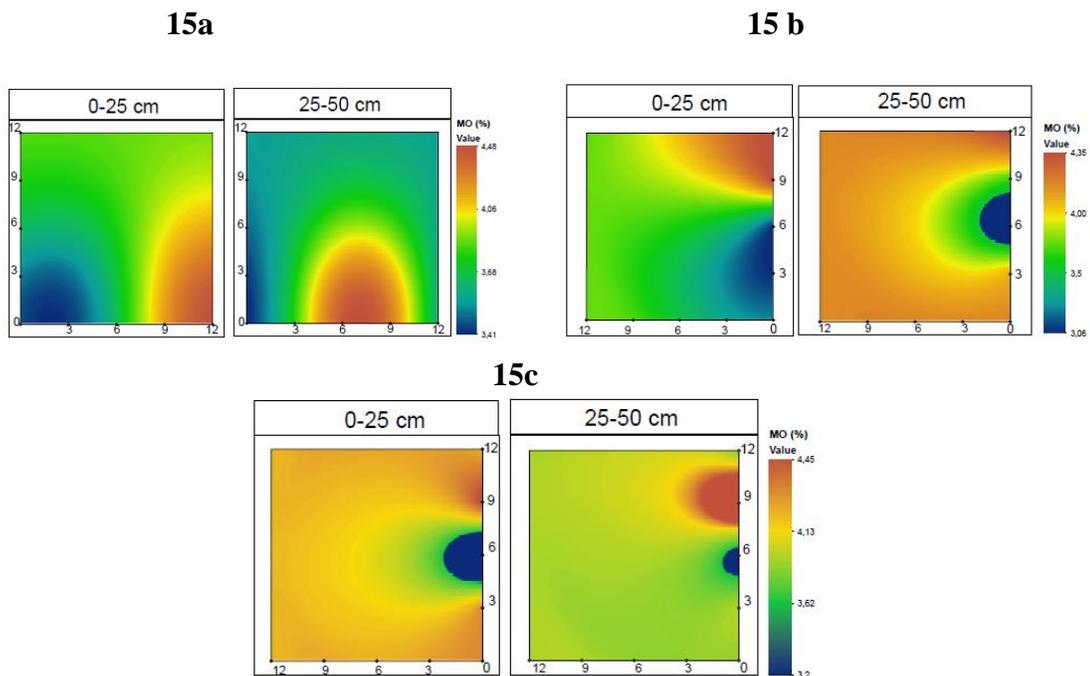
manifiestan alrededor del 27%. En el perfil 25-50cm solo se presentó variabilidad a los 12m(x) con valores de 27,0%. La figura **14b** exhibe en el perfil 0-25cm variación de 0m a 12m (x) aproximadamente de 30 al 35% y de 0m a 12m (y) con el 13,0 al 46,0%, mientras que en el perfil 25-50cm se observa variabilidad de 0m a 6m(x) del 13 al 23% y de 0m a 12m (y) con valores de 13 a 46,0%. En la figura **14c** en el perfil 0-25cm muestra variabilidad de 27 al 36% en las distancias de 0m a 12m(x) y desde 0m a 12m(y) con valores entre 21 al 43%. En el perfil de 25-50cm se observa una mayor variabilidad desde 0m a 12m(y) cuyos valores oscilan de 21 a 43% por el contrario desde 0m a 12m(x) se mantiene alrededor del 43%. Conforme al estudio de Amézquita et al., (2002) los valores óptimos para porosidad debe ser mayor al 50%. En la presente investigación se observa valores para porosidad menor al 50% debido al aumento de la Da, esto hace que se desestabilicen los niveles de MO del suelo y por lo tanto impide la retención de la humedad aprovechable para las plantas. Concordamos con Andrade, Da Silva y Kato (2008) al referirse a la porosidad como una de las propiedades que caracteriza la Ha del suelo.



**Figura 14.** Distribución espacial de la porosidad a 25 cm y 50 cm de profundidad.

Se presentan mapas de variabilidad espacial de la materia orgánica (MO) Figura 15, los cuales presentaron alcances de 12,22 para cada una de las zonas de muestreo respectivamente. En la figura **15a** se muestra variabilidad en el perfil 0-25cm de 0m a 12m(x) cuyos valores oscilan

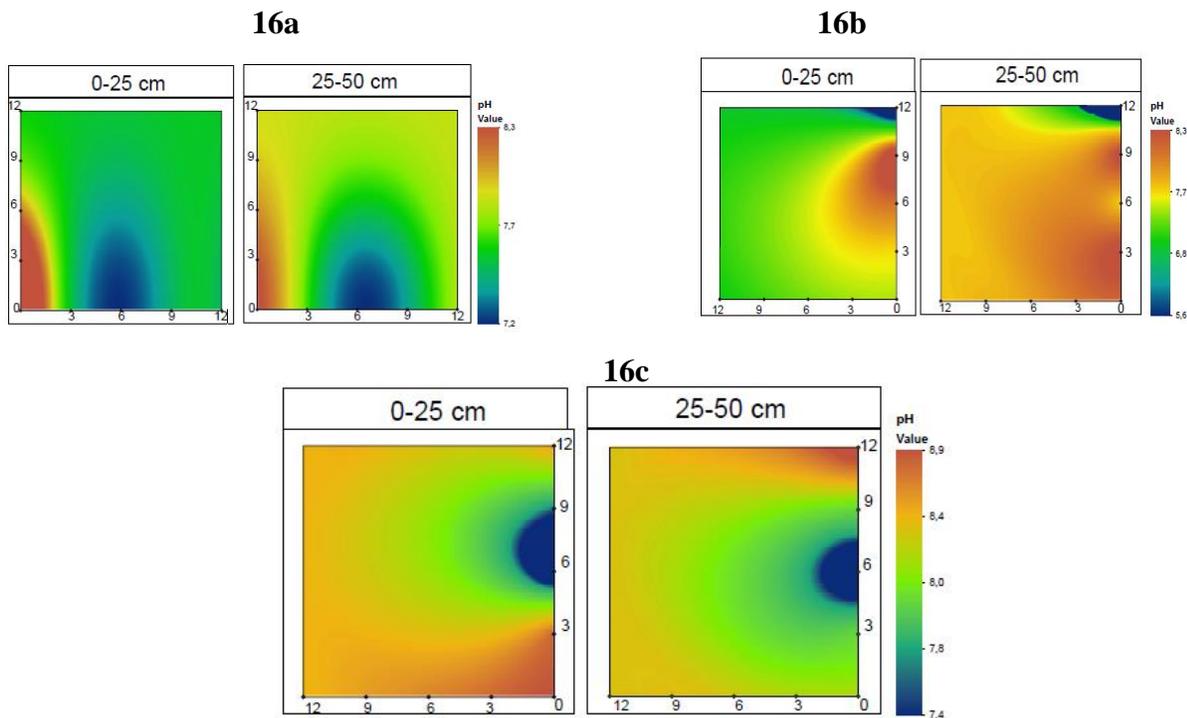
entre 3,41 a 4,48% y de 0m a 12m(y) del 3,41 al 3,68%, mientras que en el perfil 25-50cm se presenta variación desde los 0m a 12m(x) con valores alrededor de 3,41 a 4,48% y de 0m a 12m(y) entre 3,41 al 3,68 %. La figura **15b** presenta en el perfil 0-25cm variabilidad de 0m a 6m(x) con valores que parten del 3,06 al 3,5% y de 0m a 12m(y) oscilan de 3,06 al 4,35%. En el perfil 25-50cm la variación se expone desde 0m a 12m(x) cuyos valores se encuentran aproximadamente del 4,0 al 4,35% y de 0m a 12m(y) del 3,06 al 4,35%. En la figura **15c** se presenta variabilidad en el perfil 0-25cm de 3,2 al 4,45% en las distancias de 0m a 12m(y) mientras que de 0m a 12m(x) con valores de 4,13 a 4,45%. En el perfil de 25-50cm se observa una mayor variabilidad desde 0m a 12m(y) cuyos valores oscilan entre 3,2 a 4,45%, mientras que de 0m a 12m se mantienen entre 3,20 al 4,13%. La Da afecta el contenido de MO en el suelo debido a que al aumentar la Da, la MO del suelo junto con la Ha y el terreno al ser la mayoría textura arenosa retiene menos MO. Resultados descritos por Garrido (1994) indican en general, el incremento de la MO en los primeros centímetros del suelo disminuyendo en profundidad primero drásticamente y después paulatinamente hasta llegar casi a desaparecer a los 30-60m según el caso.



**Figura 15.** Distribución espacial de la MO a 25 cm y 50 cm de profundidad.

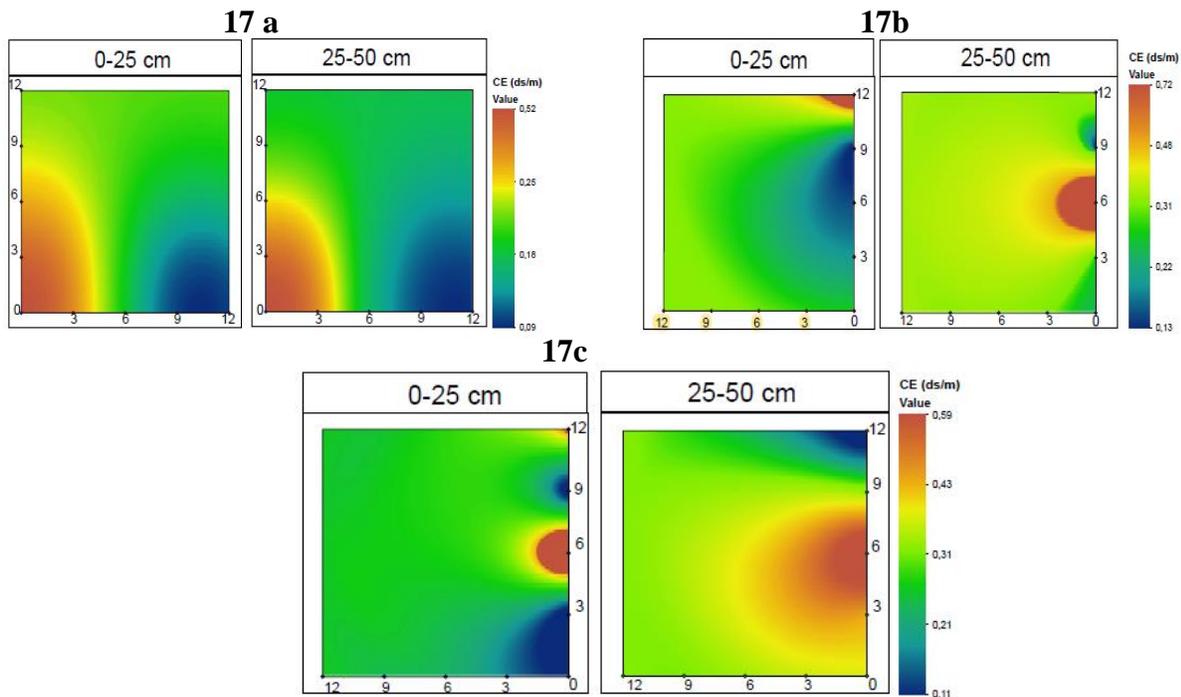
En la figura 16 se presenta los mapas de variabilidad del porcentaje de pH a diferentes profundidades obtenidos mediante el kriging ordinario, los cuales presentaron alcance de 12,2m

para cada zona de muestreo. En la figura **16a** se observa variabilidad en el perfil 0-25cm de 0m a 12m(x) cuyos valores oscilan entre 7,2 a 8,3 y de 0m a 12m(y) varía de 7,7 a 8,3 por lo tanto en el perfil 25-50cm relacionándolo con el primer estrato se observa un incremento del pH. La figura **16b** presenta en el perfil 0-25cm variación de 0m a 12m(x) con valores alrededor de 6,8 a 7,7 y de 0m a 12m(y) de 5,6 a 8,3. En el perfil 25-50cm se observa variabilidad de 0m a 12m(x) con valores de 7,7 al 8,3, mientras que de 0m a 12m(y) fluctúan entre 5,6 a 8,3, por lo tanto, nos indica que en el segundo estrato tiende a el pH a aumentar. En la figura **16c** en el perfil 0-25cm se presenta variabilidad de 8,4 a 8,9 en las distancias de 0m a 12m(x) y de 0m a 12m(y) con valores alrededor de 7,4 a 8,9. En el perfil de 25-50cm se observa una mayor variabilidad desde 0m a 12m(x) cuyos valores oscilan entre 8,0 a 8,4, mientras que de 0m a 12m(y) con valores de 7,4 a 8,9, que en relación al primer estrato se observa una ligera disminución del Ph. La finca es de textura arenosa y por lo tanto las arenas retienen menos MO, pero al ser un suelo en constante actividad agropecuaria se agrega restos de cosecha, enmiendas orgánicas con la finalidad de incrementar la MO de los suelos. Hein (1986) indica que el aumento de la MO, origina la formación de ácidos carbónicos que reaccionan con los carbonatos formando bicarbonatos solubles que son arrastrados en profundidad, produciendo la eliminación de bases, un aumento de la saturación en el suelo y consiguiente disminución del pH.



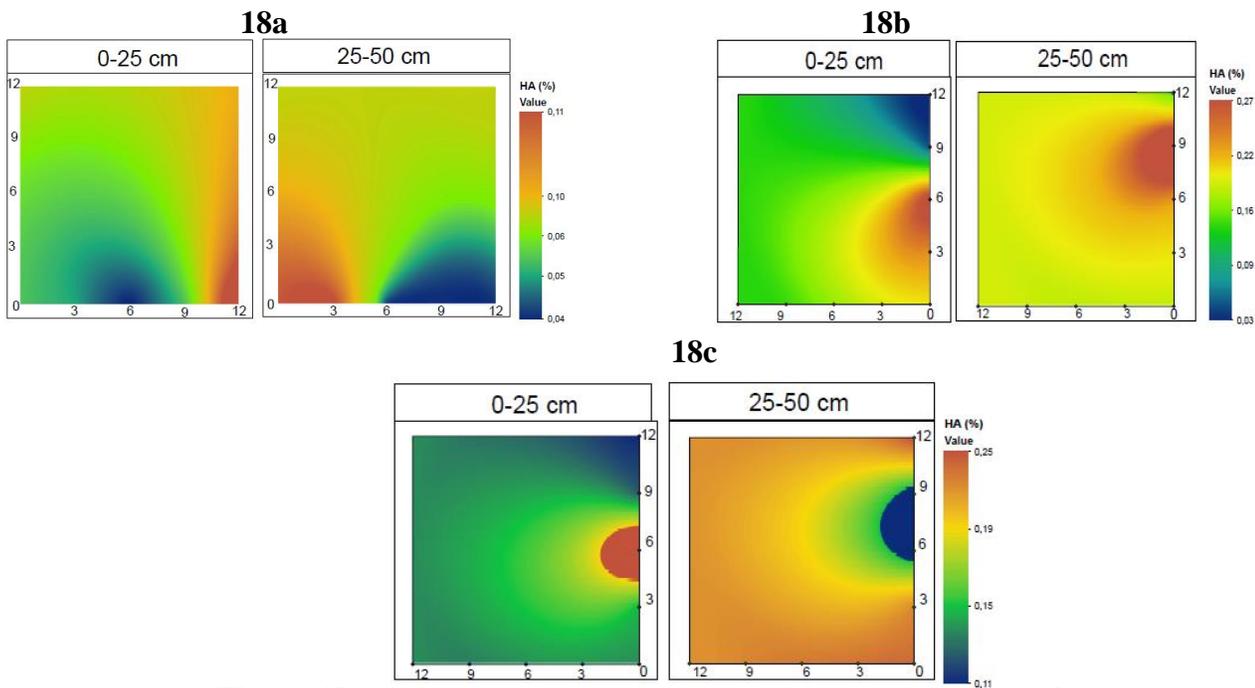
**Figura 16.** Distribución espacial del pH a 25 cm y 50 cm de profundidad

Se presentan mapas de variabilidad espacial de la conductividad eléctrica (CE) Figura 17, los cuales presentaron alcances de 12,22 para cada una de las zonas de muestreo respectivamente. En la figura **17a** se observa variabilidad en el perfil 0-25cm de 0m a 12m(x) cuyos valores oscilan entre 0,09 a 0,52 ds/m y de 0m a 12m(y) varían de 0,18 a 0,52 ds/m. En el perfil 25-50cm se presenta variación desde los 0m a 12m(x) con valores alrededor de 0,09 a 0,52 ds/m y de 0m a 12m(y) se observa entre el 0,18 a 0,52 ds/m, por lo tanto, se considera un ligero incremento de la CE en relación al primer estrato. La figura **17b** presenta en el perfil 0-25cm variabilidad de 0m a 12m(x) con valores alrededor de 0,31 ds/m y de 0m a 12m(y) fluctúan entre 0,13 a 0,72 ds/m. En el perfil 25-50cm se muestra variación de 0m a 3m(x) con valores de 0,31 ds/m, mientras que de 0m a 12m(y) aproximadamente desde el 0,13 a 0,72 ds/m y en relación al primer estrato se puede observar un incremento de la CE. En la figura **17c** en el perfil 0-25cm se presenta variabilidad de 0,11 a 0,21 ds/m en las distancias de 0m a 6m(x) y de 0m a 12m(y) con valores alrededor de 0,11 a 0,59 ds/m. En el perfil de 25-50cm la variación desde 0m a 12m(x) oscila entre 0,31 a 0,43 ds/m, mientras que de 0m a 12m(y) con valores de 0,11 a 0,59 ds/m, lo que nos muestra que a medida que aumenta la profundidad la CE aumenta. En la investigación se obtiene valores de CE menores a 0,8 ds/m al igual que Castellanos (2000) los cuales indican que el agua que se dispone para el riego es de muy buena calidad así la planta podrá nutrirse sin gastar energía.



**Figura 17.** Distribución espacial de la Conductividad eléctrica a 25 cm y 50 cm de profundidad.

En la figura 18 se presenta los mapas de variabilidad del porcentaje de humedad aprovechable (HA) a diferentes profundidades obtenidos mediante el kriging ordinario, los cuales presentaron alcance de 12,2m para cada zona de muestreo. En la figura **18a** la variabilidad en el perfil 0-25cm de 0m a 12m(x) está entre 0,04 a 0,11% y de 0m a 12m(y) presenta valores de 0,04 a 0,06%. En el perfil 25-50cm la variación ocurre desde los 0m a 12m(x) aproximadamente de 0,04 a 0,11% mientras que de 0m a 12m(y) varían de 0,06 a 0,11%. La figura **18b** presenta en el perfil 0-25cm variabilidad de 0m a 12m(x) que parten de 0,16 a 0,22% y de 0m a 12m(y) con valores entre 0,03 a 0,27%. En el perfil 25-50cm de 0m a 12m(x) se establece la variación con valores entre 0,16 a 0,22%, mientras que de 0m a 12m(y) desde 0,16 a 0,27%. En la figura **18c** en el perfil 0-25cm se presenta homogeneidad de 0,15% en las distancias de 0m a 12m(x) y variabilidad desde 0m a 12m(y) con valores alrededor de 0,11 a 0,25%. En el perfil de 25-50cm se observa una mayor variabilidad desde 0m a 12m(y) cuyos valores oscilan entre 0,11 a 0,25%, mientras que de 0m a 12m(x) en relación al primer estrato incrementó su valor manteniéndose a 0,25%. La humedad aprovechable (HA) presenta correlación negativa con la Da, a medida que la humedad aprovechable aumente, la Da disminuye beneficiando da la mejora de la estructura y configuración porosa del suelo. Concordamos con Andrade, Da Silva y Kato (2008) al referirse a la porosidad como una de las propiedades que caracteriza la Ha del suelo.



**Figura 18.** Distribución espacial de la Ha a 25cm y 50 cm de profundidad.

## 5. CONCLUSIONES

-Las técnicas multivariadas permitieron entender el comportamiento individual de las fracciones granulométricas y en relación con el contenido de humedad y la densidad aparente.

-La textura al tener relación directa con la capacidad de retención de agua es una variable fundamental para conocer la variabilidad de la humedad.

-El análisis de correlación de Pearson demostró que la humedad aprovechable del suelo tiene una correlación directa con la materia orgánica (MO) y con la porosidad del suelo debido a que al aumentar la materia orgánica también incrementa la porosidad del suelo mejorando la estructura y se obtiene una mejor conservación de la humedad aprovechable en el suelo

-La densidad aparente ( $D_a$ ), al aumentar su valor disminuye su capacidad de retención de agua, estando también en relación al contenido de arena, presentando poros de mayor diámetro lo que conlleva a drenar fácilmente al suelo.

-La variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo es mayor a partir de los 3 metros.

-La aplicación de la geo estadística permitió interpretar resultados a través de la elaboración de mapas de variabilidad espacial, los cuales son importantes porque proveen de información para el manejo de la finca y futuras tomas de decisiones.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Amezquita, E., Chavez, L., Molina, D., & Galvis, J. (2002). Susceptibilidad a la compactación en diferentes sistemas de uso del suelo en los llanos orientales de Colombia . *Dialnet*, 202-217.
- Andrade, Da Silva, C., & Kato, E. (2008). Modelos de ajuste e métodos para a determinação da curva de retenção de agua de um Latossolo-Vermelho-Amarelo. *Revista Brasileira de Ciencias do Solo*, 32:515-523.
- Arias, F., Mata, R., Alvarado, A., E, S., & Laguna, J. (2010). Caracterización taxonómica de algunos suelos cultivados con banano en las llanuras aluviales del Caribe de Costa Rica. *Agronomia Costarricense*, 177-195.
- Bashir, T., & Kour, M. (2018). Effect of Silt Content on the Strength Property of Concrete – A Case Study. *International journal of engineering research & technology (IJERT)*, Volume 07.
- Berry, P., & Reid, D. (1993). *Mecanica de suelos*. McGraw-Hill.
- Castellanos, R. (2000). *Manual de interpretación de analisis de suelos y agua*. Mexico: Intagri.
- Cucunuba, J., Alvarez, J., & Camacho, J. (2011). Identification of agronomic management units based on physical attributes of soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 87-99.
- Delgado, D. (2017). Aplicación de enmienda orgánicas para la recuperación de propiedades físicas del suelo asociadas a la erosión hídrica. 77-82.
- Dercourt, J., & Paquet, J. (1984). *Fundamentos de Geología*. París: Reverté.
- Dick, R. (2004). Soil biological, chemical, and physical dynamics during transition to nonthermal residue management grass seed systems.
- Domenech, M. B. (2017). Caracterización de la variabilidad espacial de propiedades del suelo a partir de la conductividad eléctrica aparente. *Caracterización de la variabilidad espacial de propiedades del suelo a partir de la conductividad eléctrica aparente*. Universidad Nacional del Sur, Buenos Aires.

- Donoso, C. (1992). *Ecología Forestal: El Bosque y su Medio Ambiente*. Santiago-Chile: Editorial Universitaria.
- Eremin, D., & Eremina, D. (2016). Influence of Granulometric Composition Structure of Anthropogenic- reformed Soil on Ecology of Infrastructure. *Procedia Engineering*, 788-793.
- Fidalski, J. T. (2007). Especialização vertical e horizontal dos indicadores de qualidade para um Latossolo Vermelho cultivado com citros. . *Revista de brasileira de ciencia do solo*, 31, 9-19.
- Garrido, M. (1994). Interpretacion de analisis de suelo. *Hojas divulgadoras*.
- González, J., Guerra, F., & Gómez, H. (2007). Conceptos basicos de geoestadistica en geografía y ciencias de la teirra. *Geoenseñanza*, 81-90.
- Goovaerts, P. (1999). Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *GEODERMA*, 89.
- Guatibonza, M. Á.-H. (2009). Distribución espacial de la conductividad hidráulica en un lote de la granja Tunguavita (Paipa,Colombia). *Agronomía Colombiana*, 261-271.
- Gunda, T., Nawagamuwa, U., & Hornberger, G. (2017). Combined impact of local climate and soil properties on soil moisture patterns. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 1-22.
- Haddad, N. (2003). Why Study Earth System Science. 40. Retrieved marzo 5, 2020, from <http://serc.carleton.edu/files/eet/globe/EarthSysInt.pdf>
- Hein, N. (1986). Reacción del suelo. *INTA*.
- Heredia, E. (2013). Densidad real, aparente y porosidad del suelo. (P. U. Perú, Ed.) *Academia*. Retrieved from <https://www.academia.edu/>
- Hernandez, J., Diaz, E., & Cerana, J. (2019). Estimación del punto de marchitez permanente en suelos de la provincia de entre Rios. *ResearchGate*, 1-5.
- Huang, P. (2004). Soil Mineral-Organic Matter-Microorganism Intercations: Fundamentals and Impacts. *Advances in Agronomy*, 82. 391-472.

- Jaramillo, D. F. (2006). Efecto de la variabilidad sistemática de la producción de frijol en experimentos de fertilización. Segunda siembra. *Revista Facultad Nacional de Agronomía De Medellín*, 3147-3165.
- Jimenez, A., & Siavosh, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé*, 381-397.
- Labati, R., Genovese, A., Muñoz, E., Piuri, V., & Scotti, F. (2018). 3-D Granulometry Using Image Processing. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 1251-1264.
- Liu, H., Tian, Q., Chen, C., & Li, Y. (2010). A hybrid statistical method to predict wind speed and wind power. *Renewable Energy*, 1857-1861.
- Liu, Q., Reichle, R., Bindlish, R., Cosh, M., Crow, W., Jeu, R., & Jackson, T. (2018). The contributions of precipitation and soil moisture observations to the skill of soil moisture estimates in a land data assimilation system. *Journal of Hydrometeorology*, 750-765.
- Liu, Z., Dugan, B., Masiello, C., & Gonnermann, H. (2017). Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. *Plos one*, 1-19.
- Lobsey, C., & Viscarra, R. (2016). Sensing of soil bulk density for more accurate carbon. *European Journal of Soil Science*, 504-513.
- Mentges, M., Reichert, J., Rodrigues, M., Awe, G., & Mentges, L. (2016). Capacity and intensity soil aeration properties affected by granulometry, moisture, and structure in no-tillage soils. *Geoderma*, 47-59.
- Monroy, F., Álvarez, J., & Alvarado, O. (2017). Distribución espacial de algunas propiedades físicas del suelo en un transecto de la granja Tunguavita, Paipa. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 91-100.
- Monroy-Rodríguez, F. (2017). DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE ALGUNAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO EN UN TRANSECTO DE LA GRANJA TUNGUAVITA, PAIPA. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.*, 91-100.

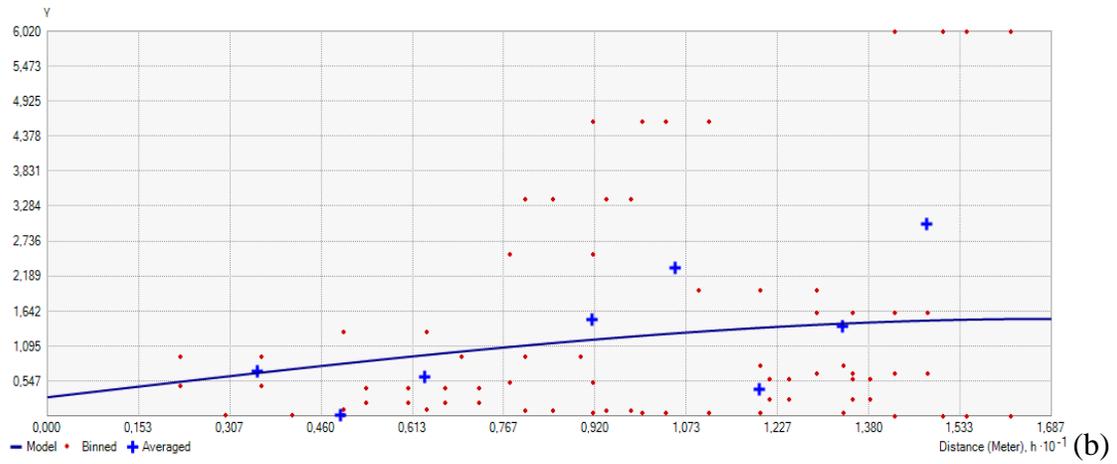
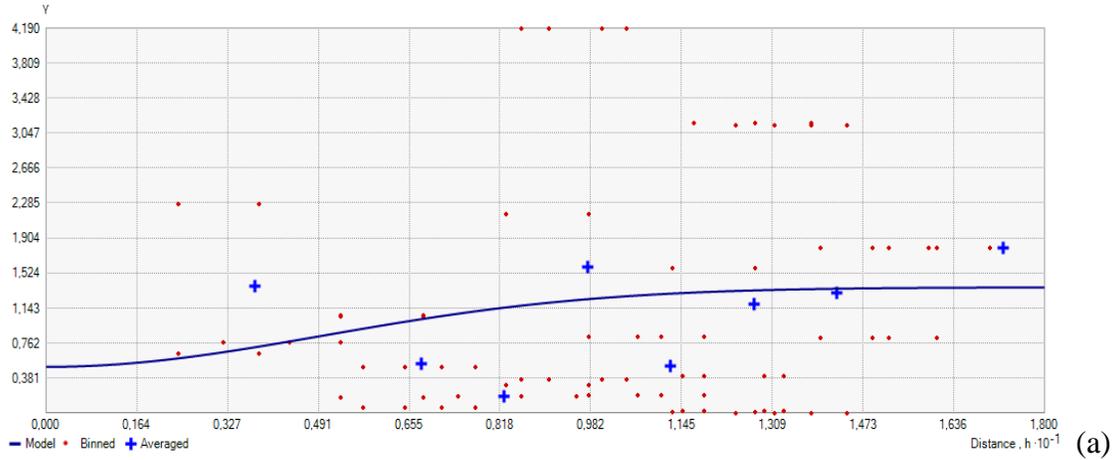
- Mori, L., Alavi, E., & Mooney, M. (2017). Apparent density evaluation methods to assess the effectiveness of soil conditioning. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 175-186.
- Murillo, D., Ortega, I., Carrillo, J., Pardo, A., Rendón, & J. (2012). Comparación de métodos de interpolación para la generación de Mapas de Ruido en entornos urbanos. *Ingenierías USBMed*, 62-68.
- Niño, L. (2008). Uso de la función semivariograma y estimación kriging en el análisis espacial de un indicador entomológico de *Aedes aegypti*. *Biomédica*, 28, 578-586.
- Oliver, M., & Webster, R. (2015). *Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging*. Suecia : Springer.
- Ovalles, F. (1992). Metodología para determinar la superficie representada por muestras tomadas con fines de fertilidad. *FONAIAP-CENIAP-IIAG*, 44.
- Palma-López, D. Z.-C.-Z.-G.-C.-T.-O. (2017). Clasificación y cartografía de suelos del estado de Campeche, México. *Agroproductividad*, 71-78.
- Porta, J., Lopez, M., & Poch, R. (2014). *Edafología; Uso y Protección de suelos* . Cataluña : Mundi-Prensa Libros.
- Porta, P. y.-A. (2019). *Edafología: uso y protección de suelos*. Cataluña: Mundi-Prensa Libros.
- Preene Groundwater Consulting. ( 2014, July 8). *What is Hydraulic Conductivity?* Retrieved from Preene Groundwater Consulting: <https://www.preene.com/blog/2014/07/what-is-hydraulic-conductivity>
- Ramirez, R. (1997). *Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo*. Santa fé de Bogota: Produmedios.
- Rodríguez, F., Camacho, J., & Rubiano, Y. (2016). Variabilidad espacial de los atributos químicos del suelo en el rendimiento y calidad de café. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 237-254.

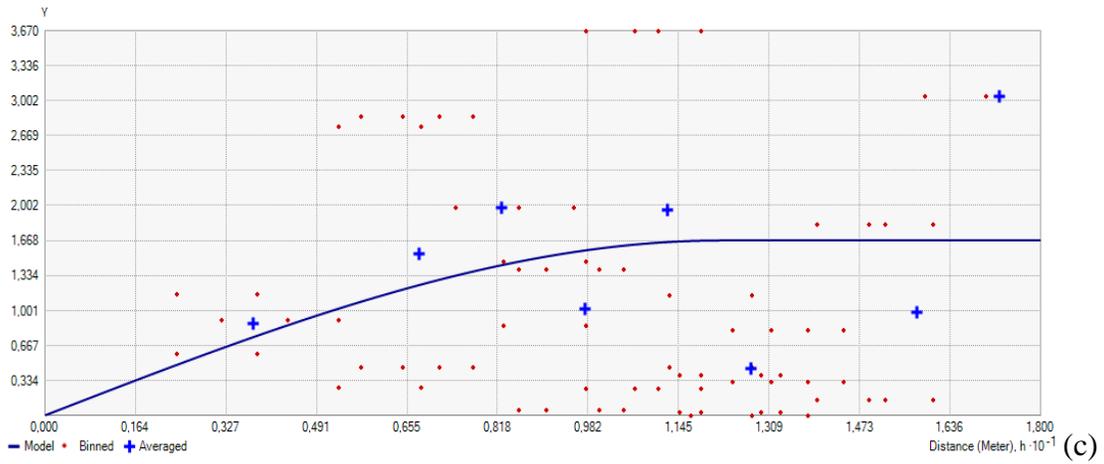
- Santiago, B., Martínez, M., Rubio, E., Vaquera, H., & Sánchez, J. (2018). Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo en un sistema lama-bordo en la Mixteca Alta de Oaxaca, México. *Agricultura, sociedad y desarrollo*, 275-288.
- Shete, P., Deshmukh, R., & Kayte, J. (2019). Determination of Soil Texture Distribution (Clay, Sand and Silt) by using Spectral Measurement: A Review. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR)*.
- Stine, M., & Weil, R. (2002). The relationship between soil quality and crop productivity across three tillage systems in South Central Honduras. *Australian Journal of Alternative Agriculture*, 17:2-8.
- Stoops, G., Marcelino, V., & Mees, F. (2018). *Interpretation of Micromorphological Features of Soils and Regoliths*. Amsterdam: ScienceDirect.
- Universidad Nacional de Colombia. (n.d.). *biblioteca digital.universidad nacional de colombia* . Retrieved from [http://www.bdigital.unal.edu.co/4787/7/70064307.\\_1998\\_3.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/4787/7/70064307._1998_3.pdf)
- Villalobos, V., & Meza, A. (2019). Impacto en la densidad aparente del suelo provocado por el tránsito de búfalos (*Bubalus bubalis*) en arrastre de madera. *Ciencias Ambientales*, 147-155 .
- Webster, R., & Oliver, M. (1990). Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *International Journal of Geographical Information*, 313-332.

## 7. ANEXOS

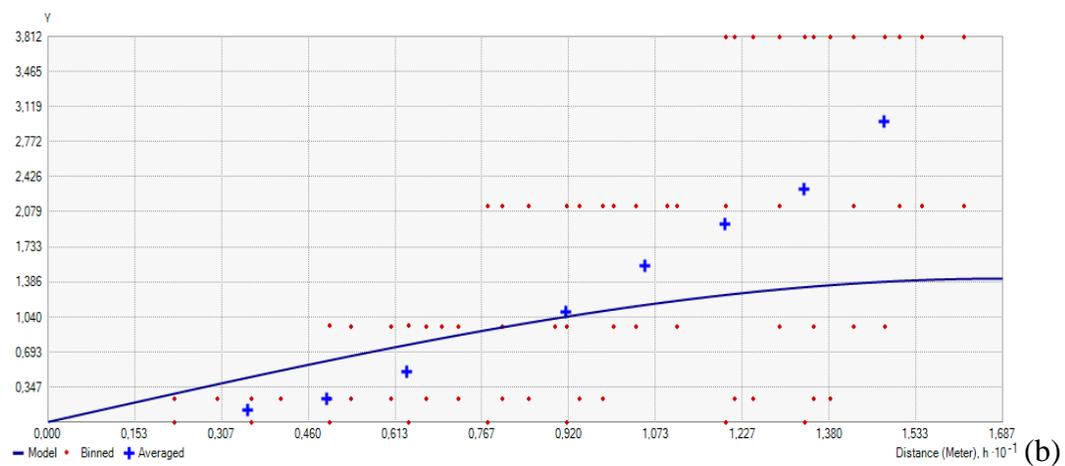
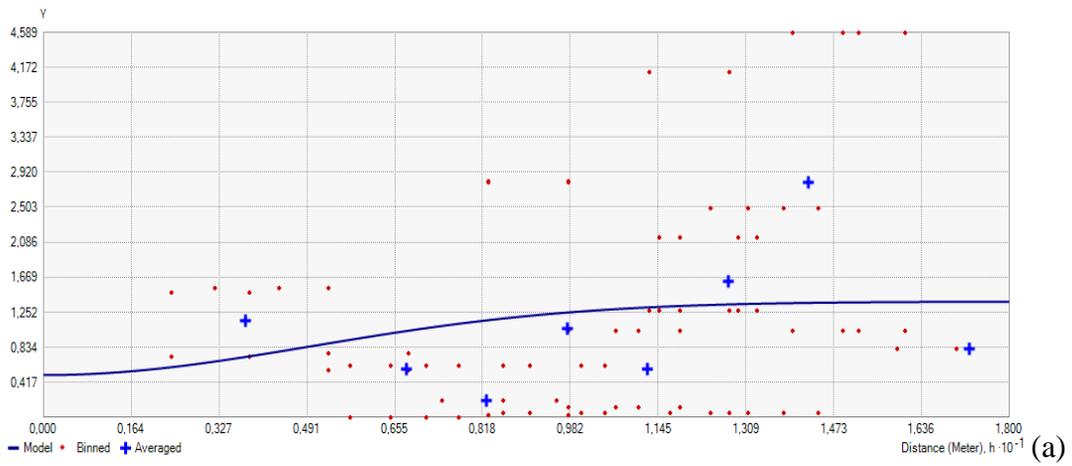
### Semivariogramas de las propiedades físicas

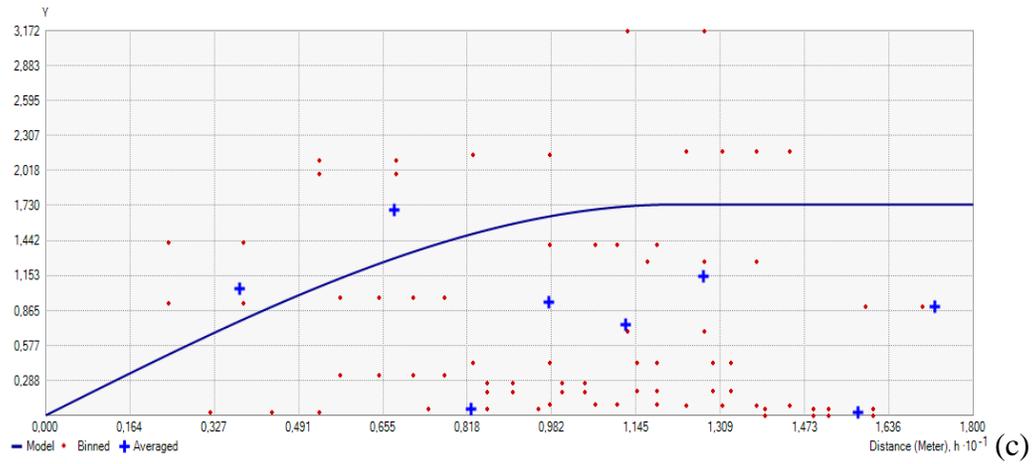
**Anexo 1:** Semivariogramas de la densidad real ( $\text{g/cm}^3$ ) en un perfil de 50 cm.





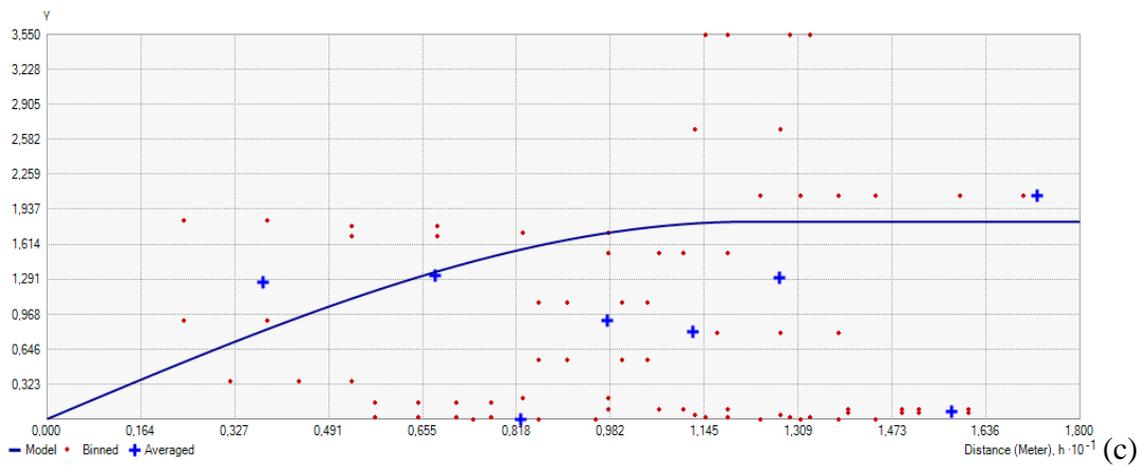
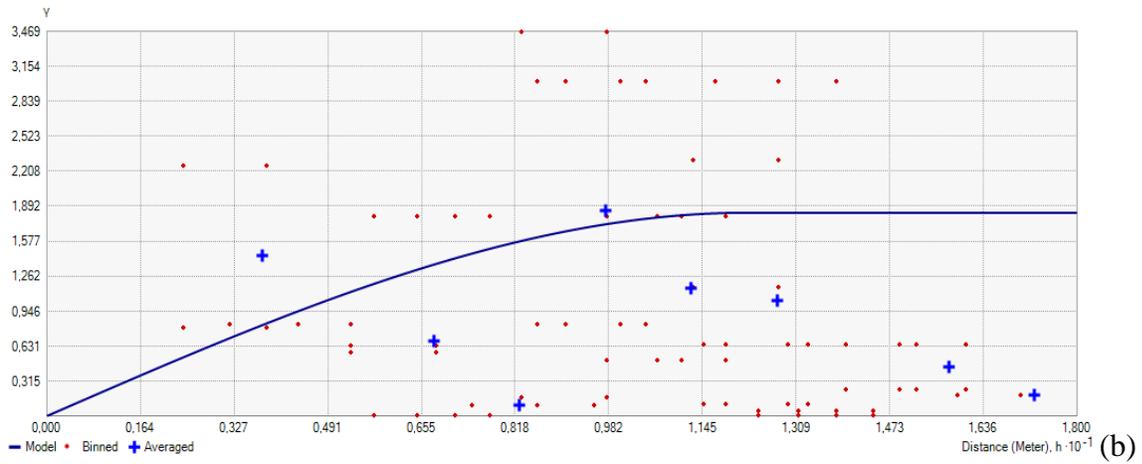
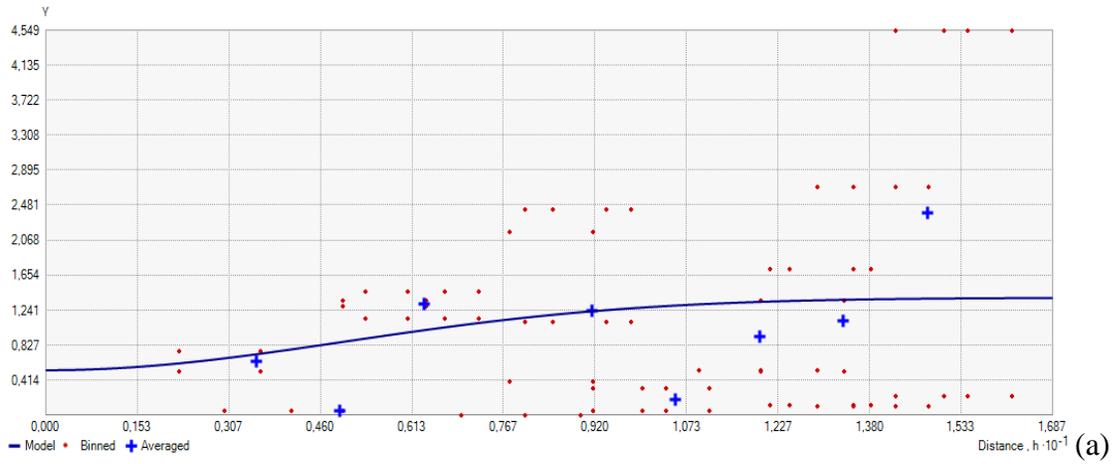
**0-25cm**



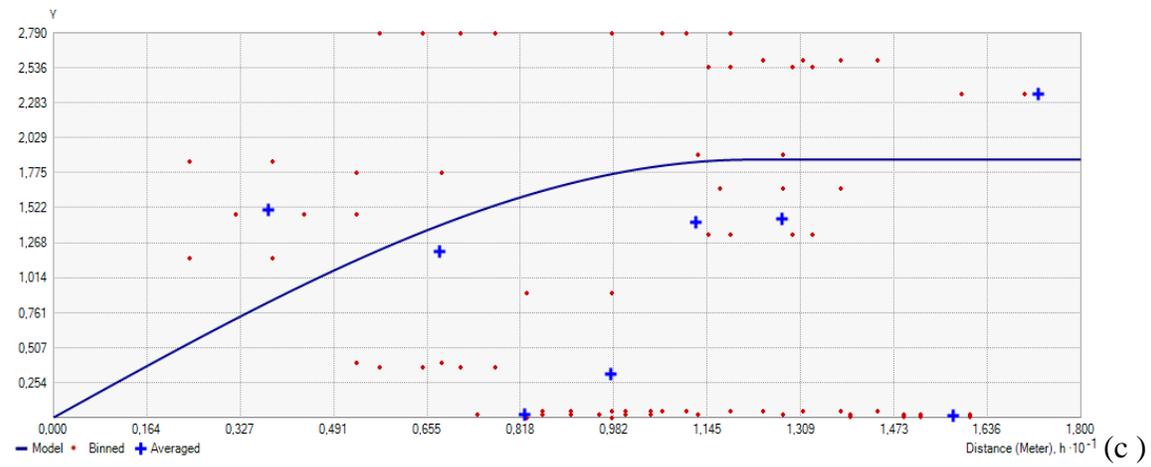
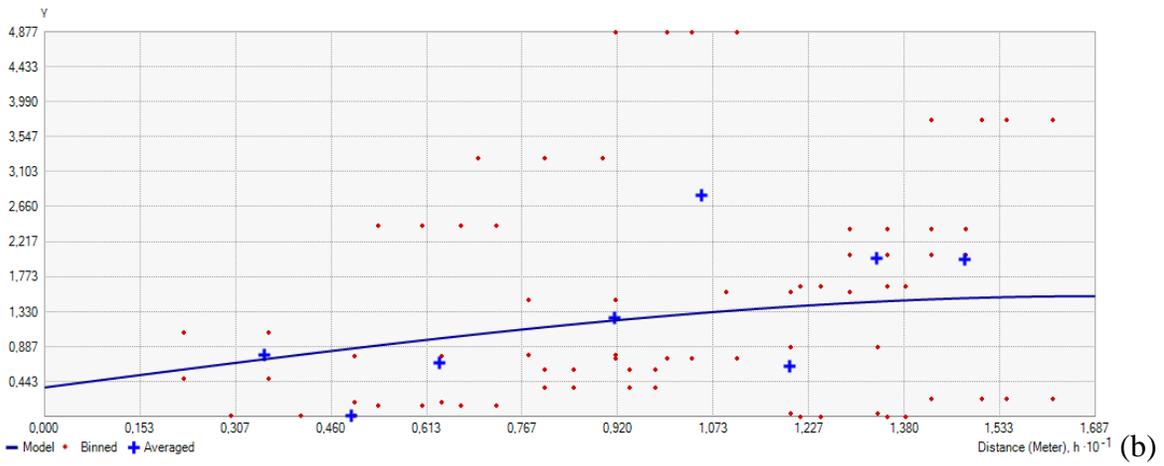
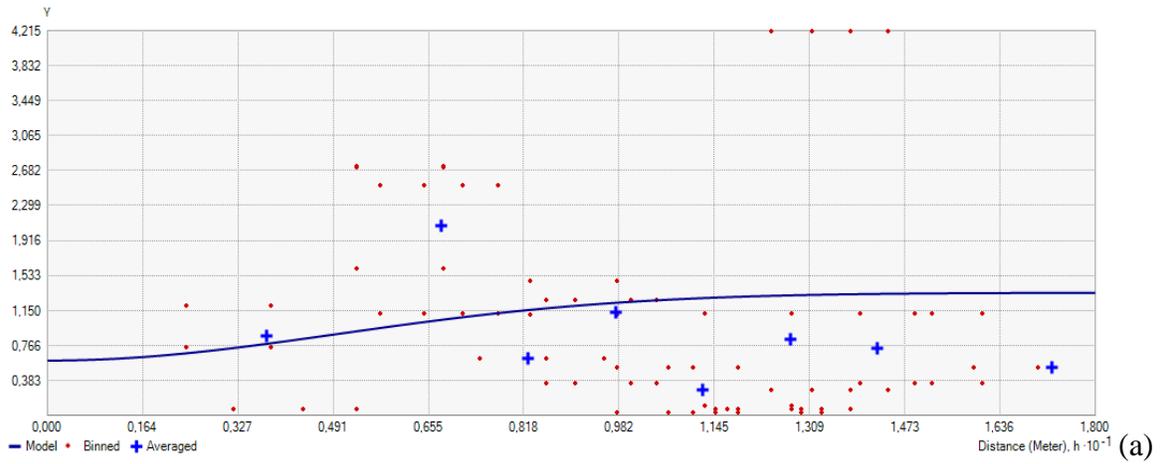


**25-50cm**

**Anexo 2: Semivariogramas de la densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>) en un perfil de 50 cm.**

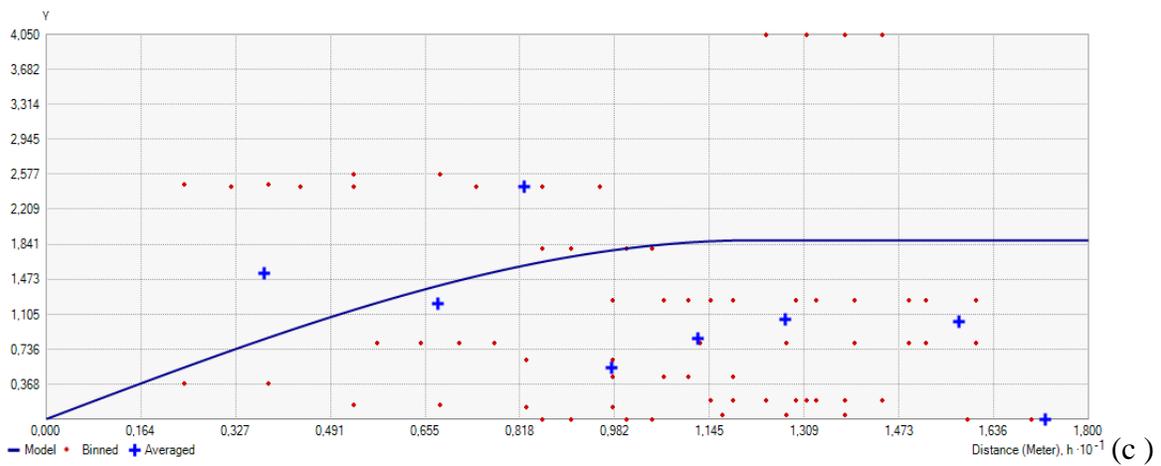
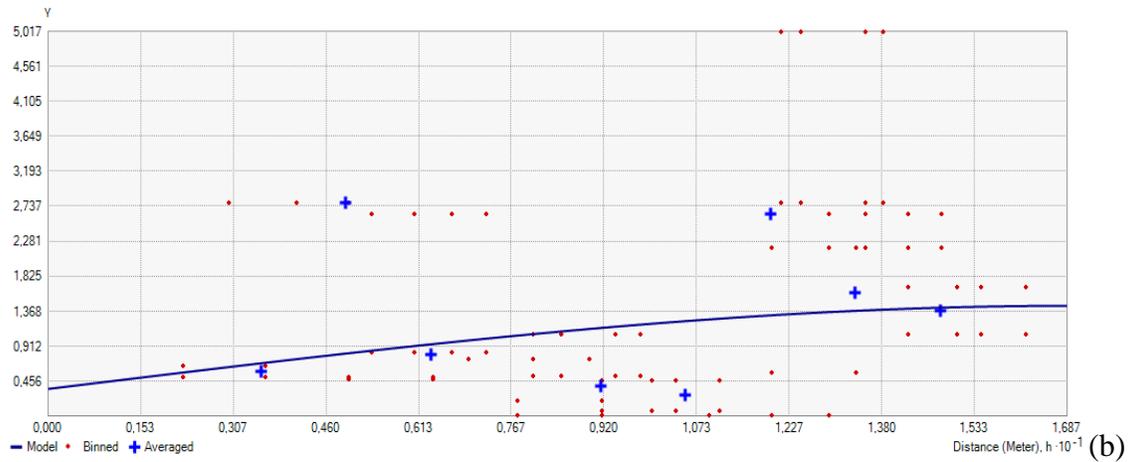
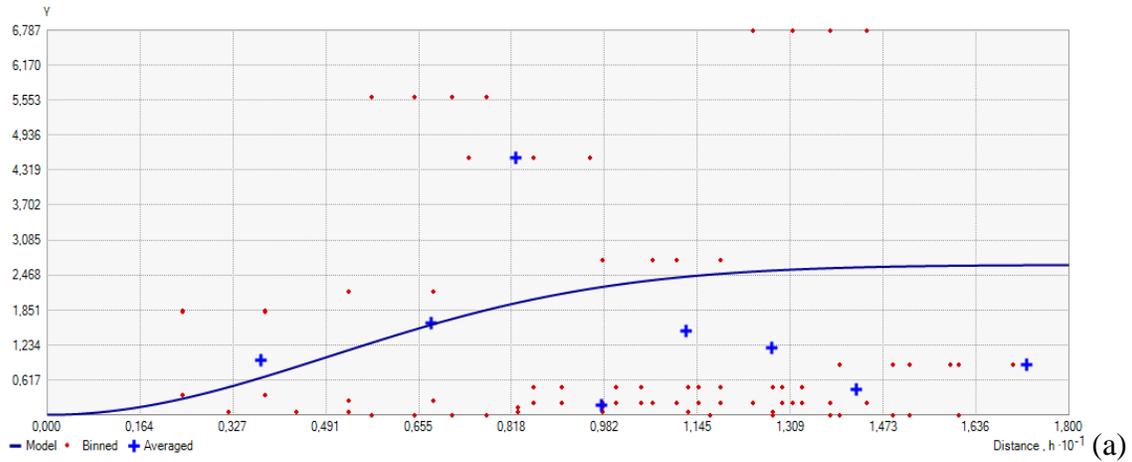


**0-25 cm**

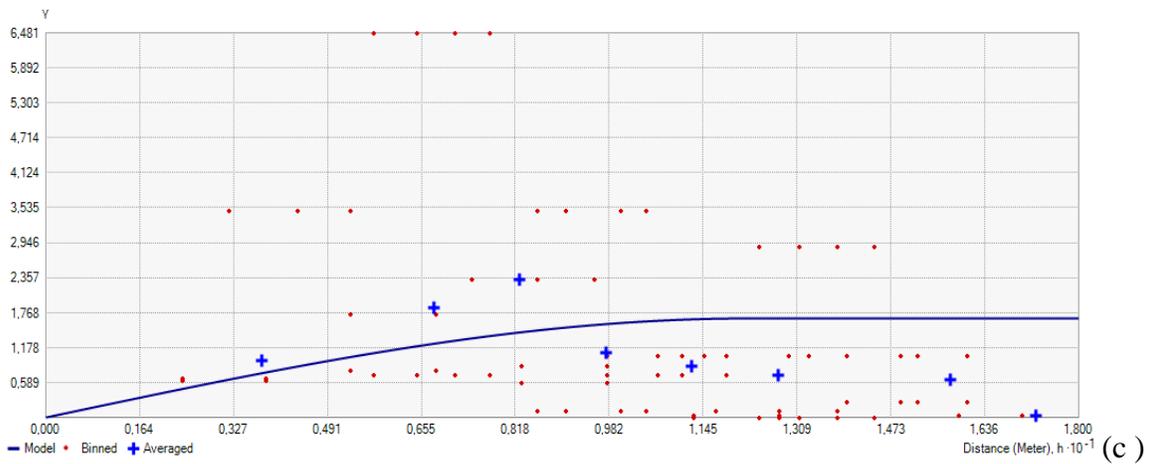
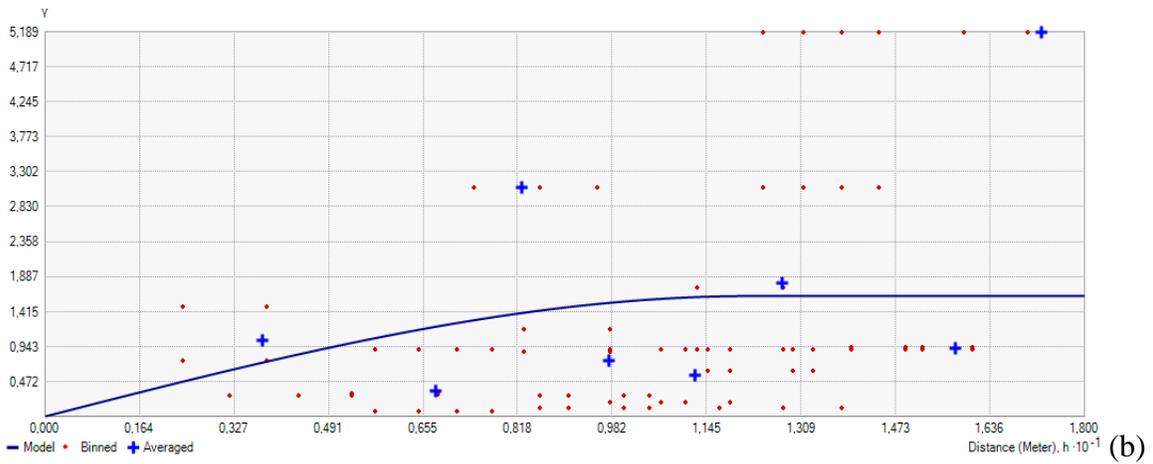
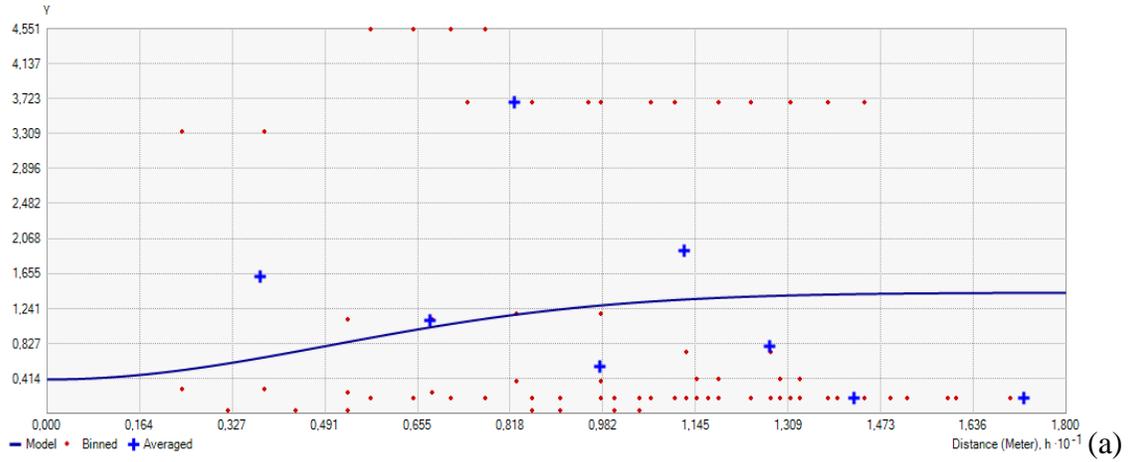


**25-50 cm**

### Anexo 3: Semivariogramas del pH (%) en un perfil de 50 cm.

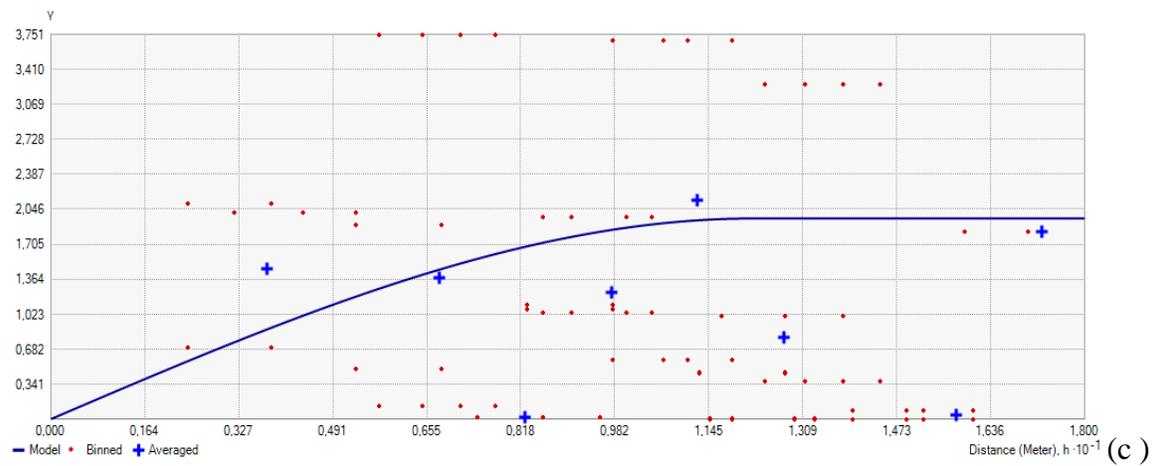
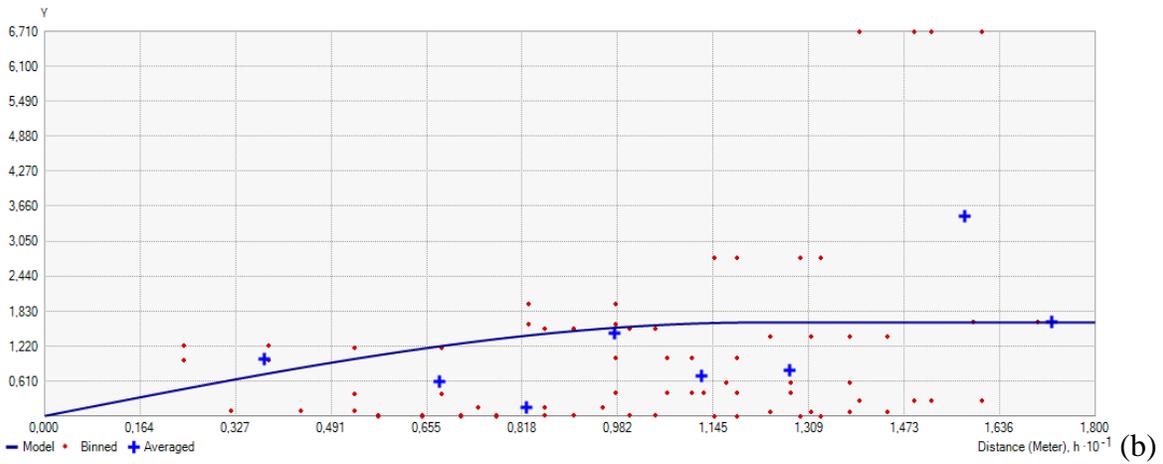
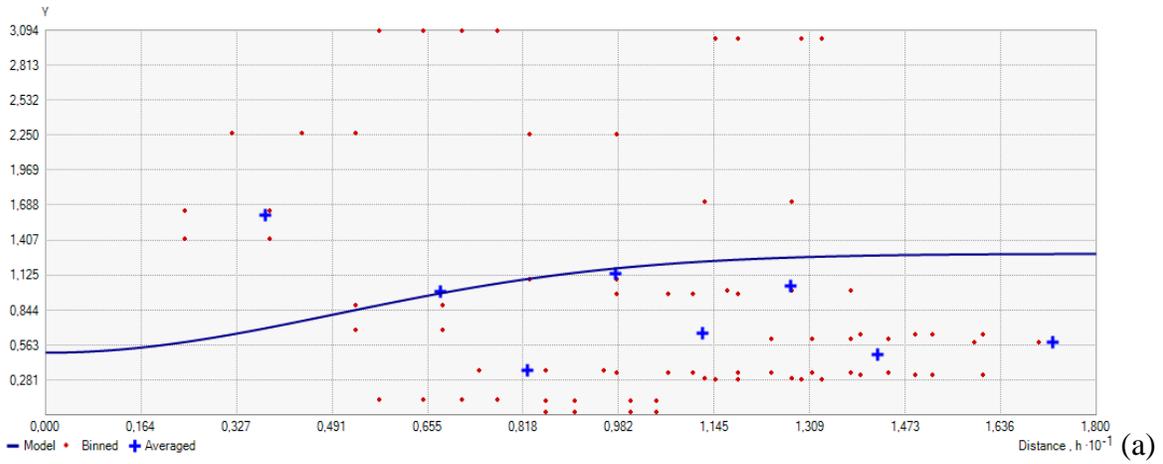


**0-25 cm**

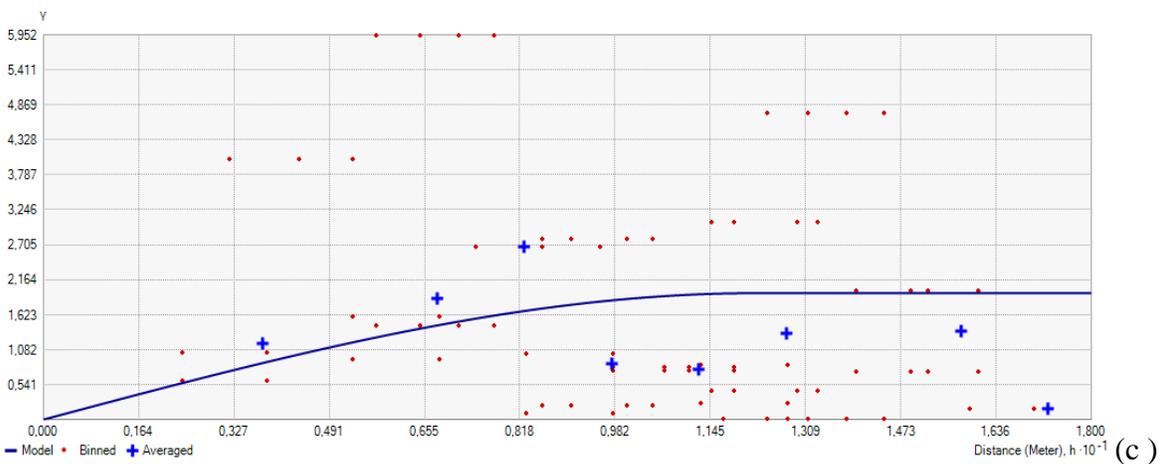
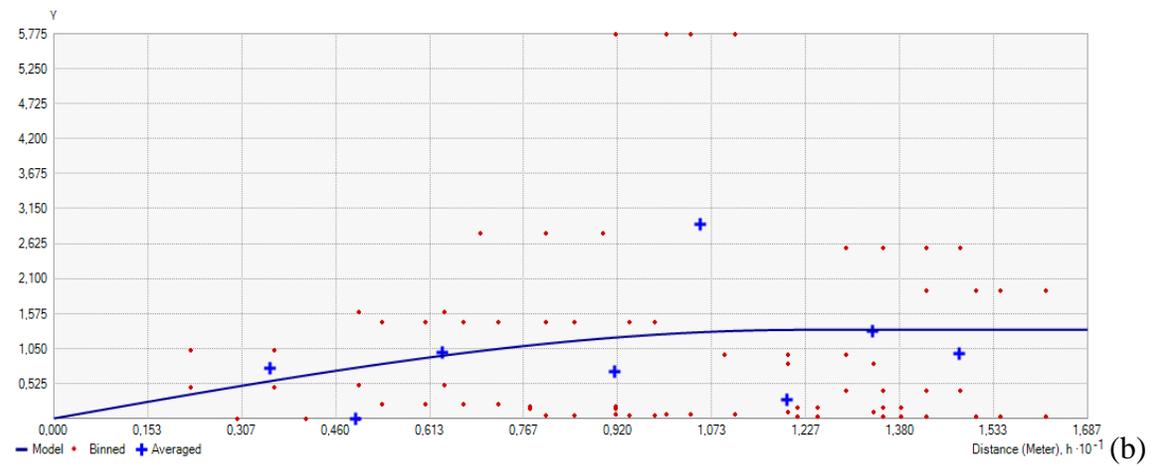
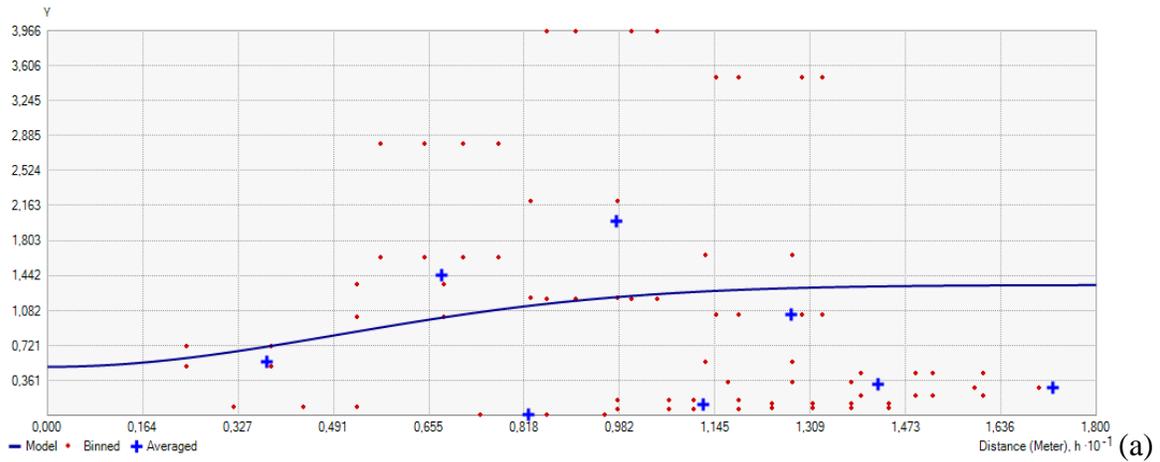


25-50 cm

**Anexo 4:** semivariogramas del CE (ds/m) en un perfil de 50 cm.

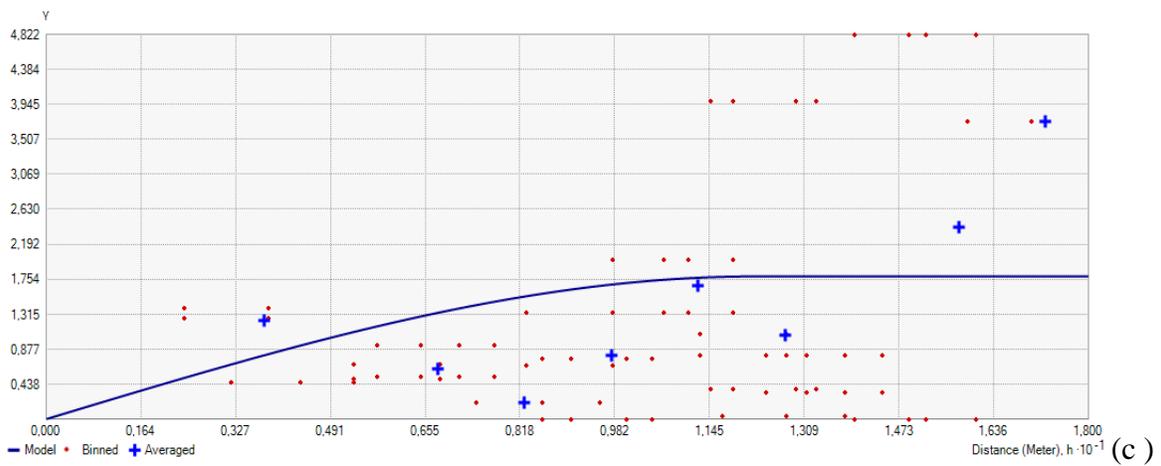
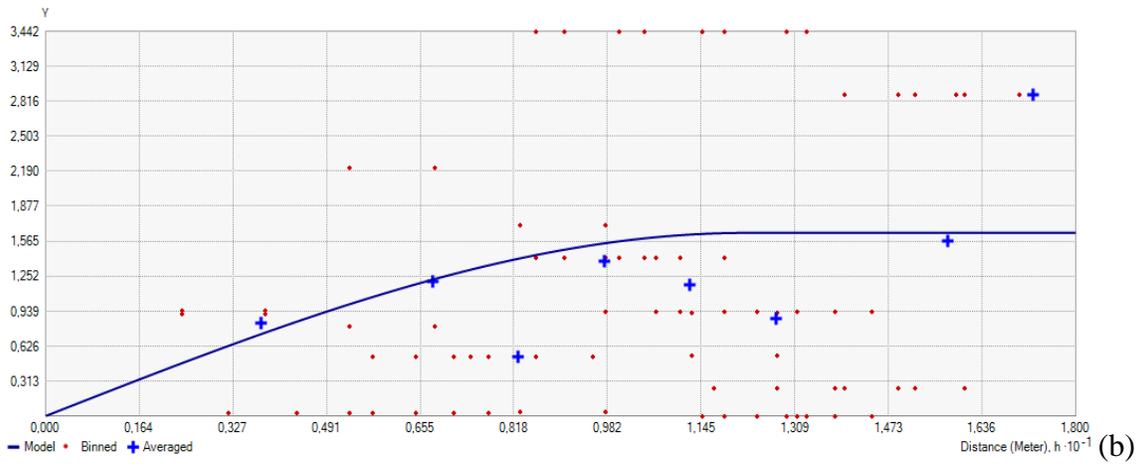
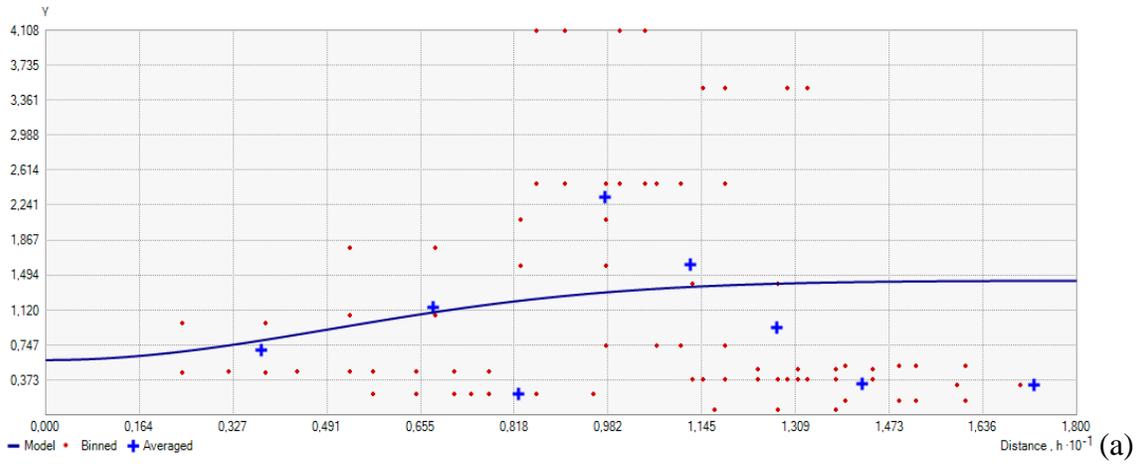


**0-25 cm**

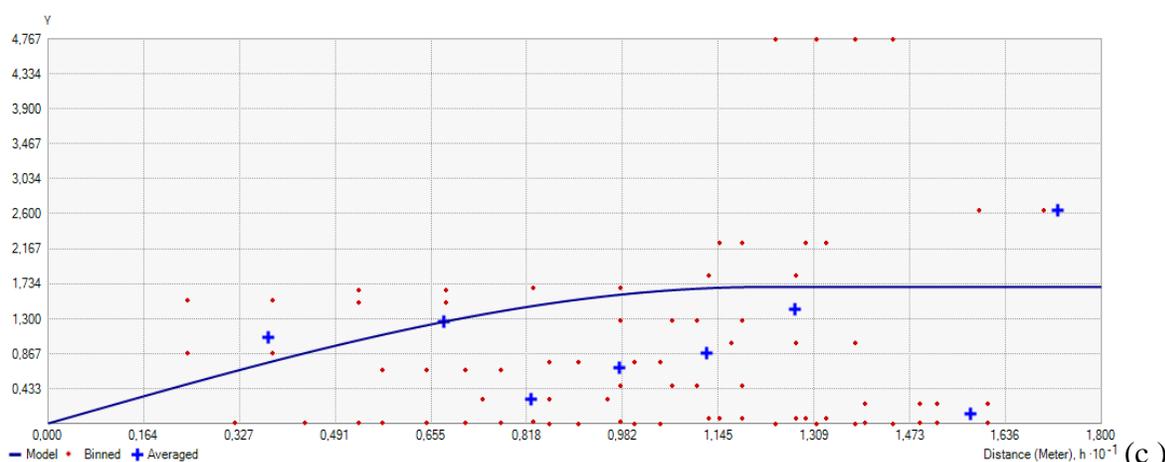
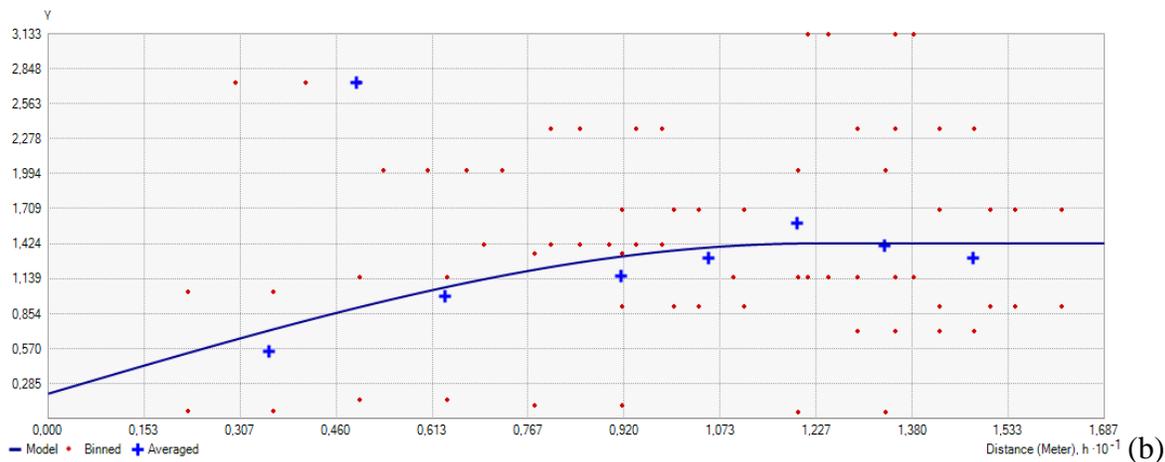
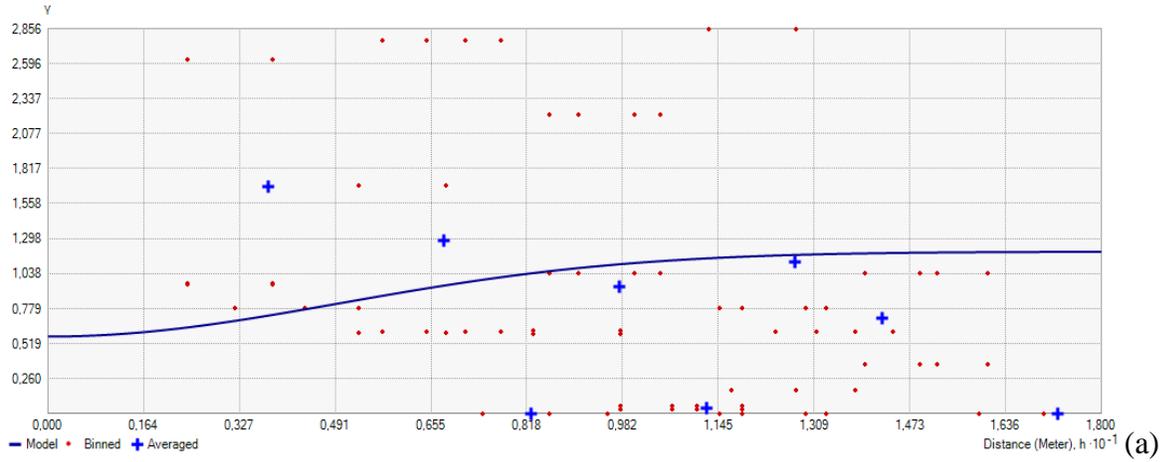


25-50 cm

**Anexo 5: semivariogramas de la MO (%) en un perfil de 50 cm.**

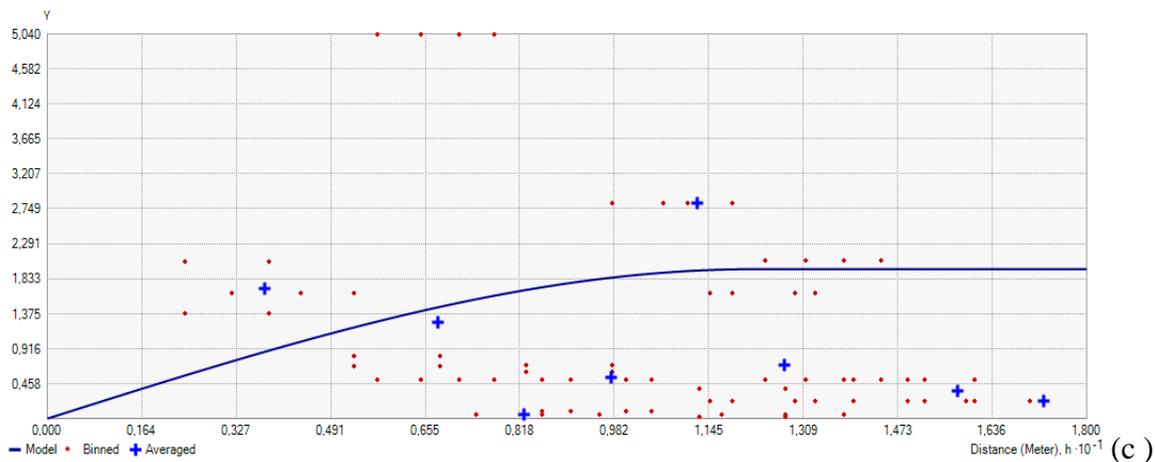
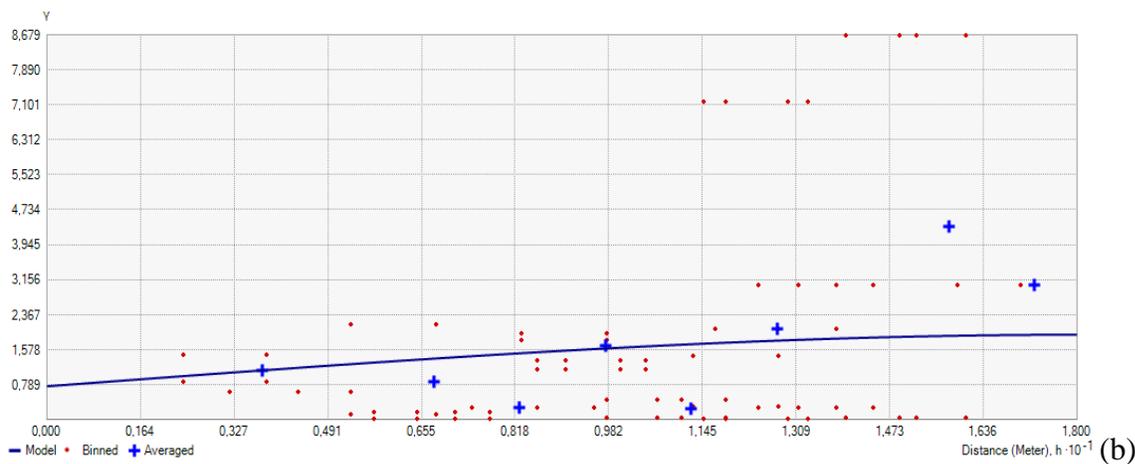
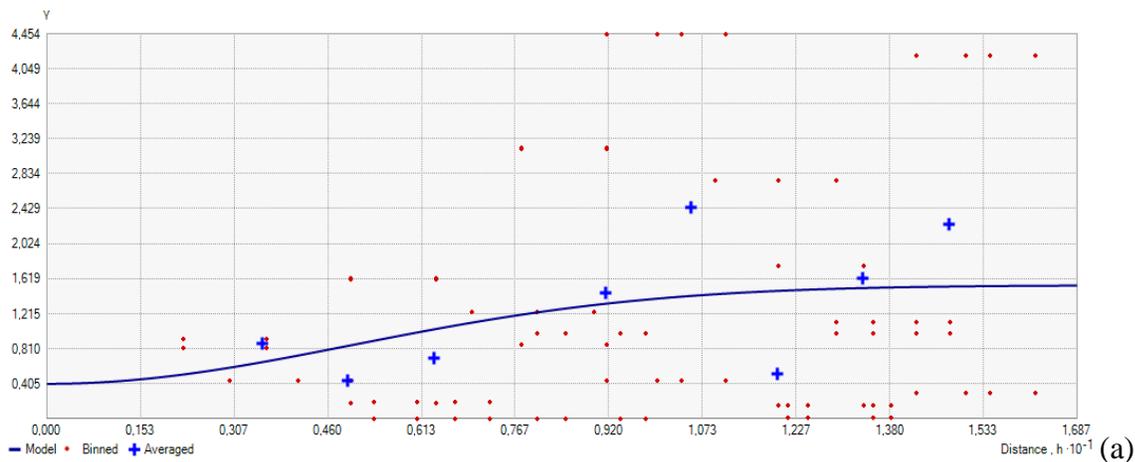


**0-25 cm**

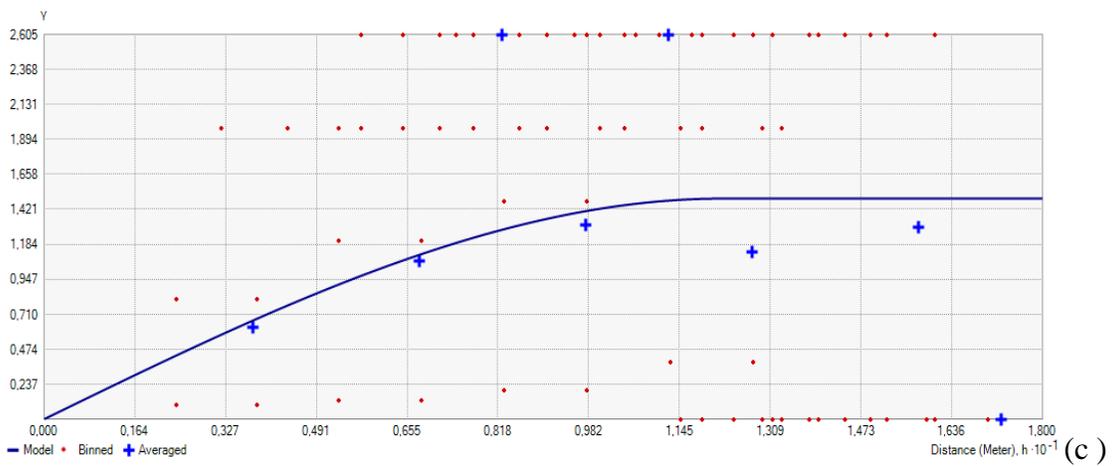
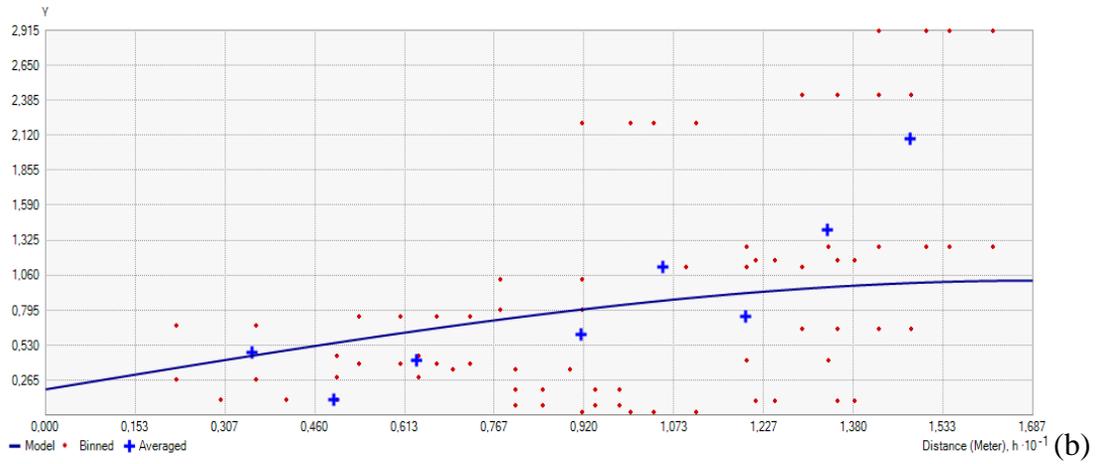
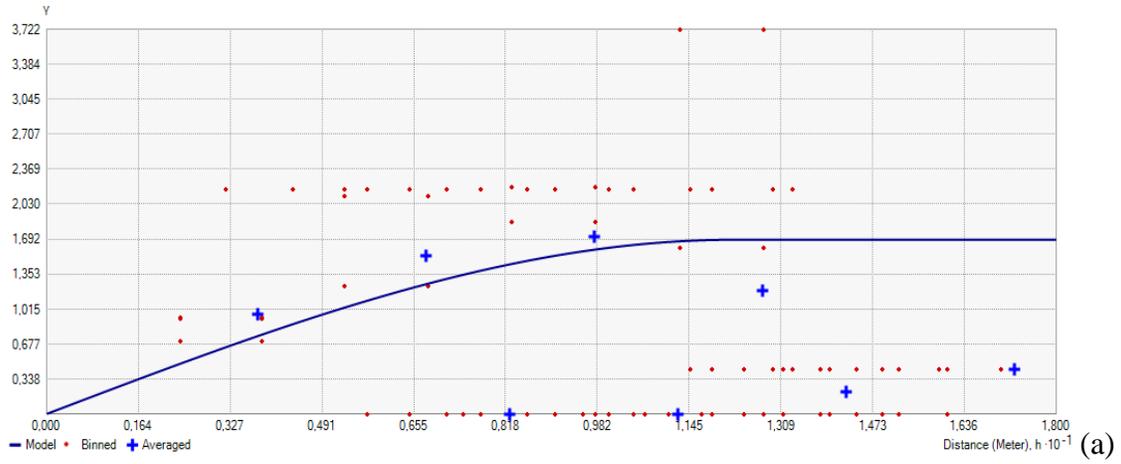


25-50cm

### Anexo 6: Semivariograma de las Arcillas (%) en un perfil de 50 cm

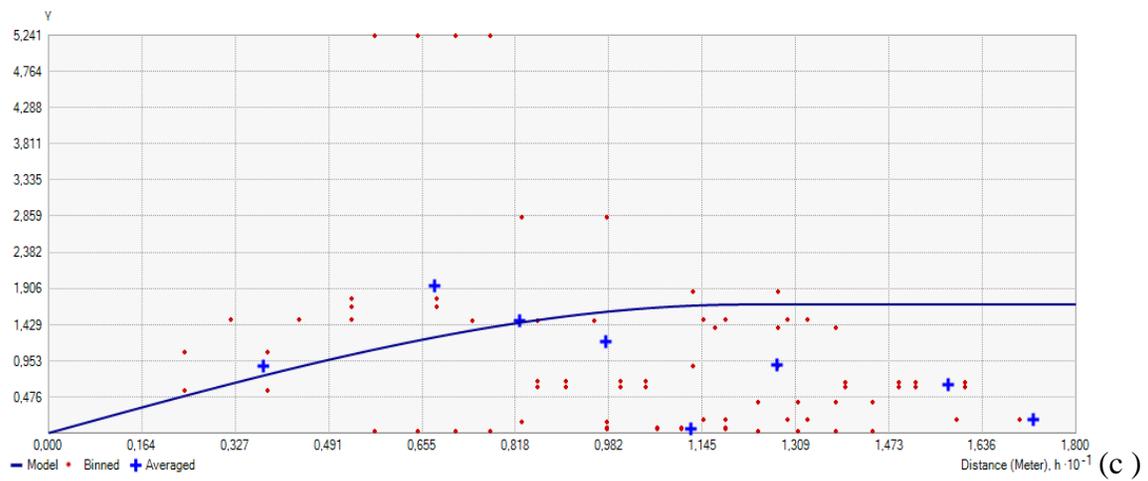
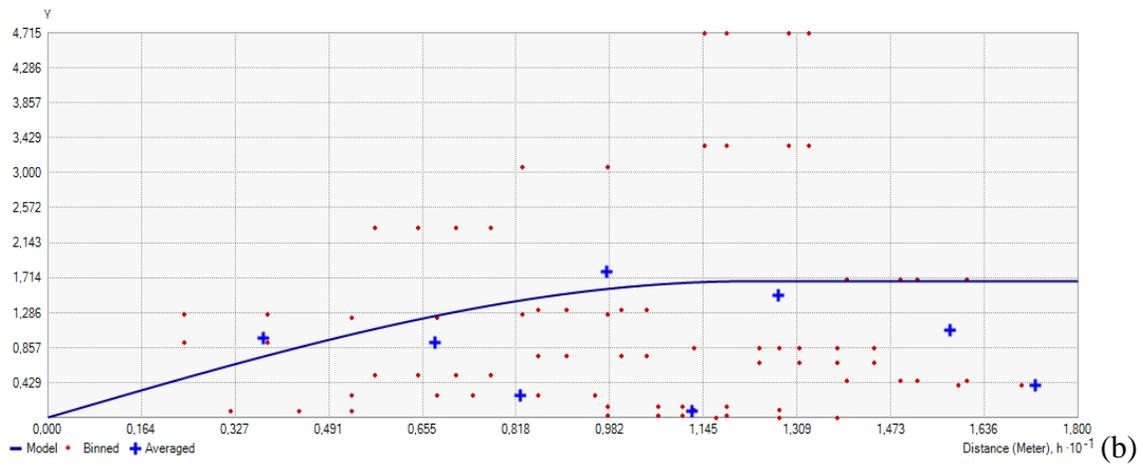
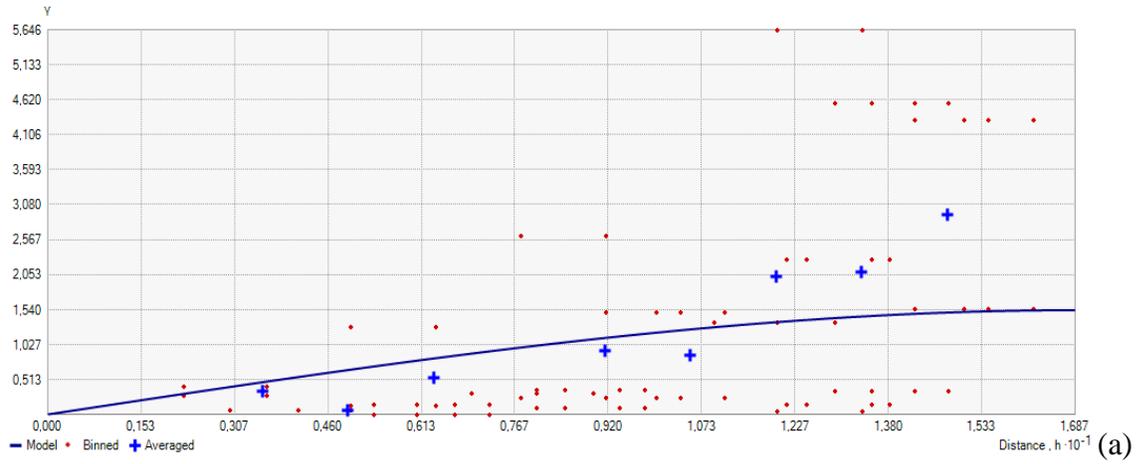


# 0-25 cm

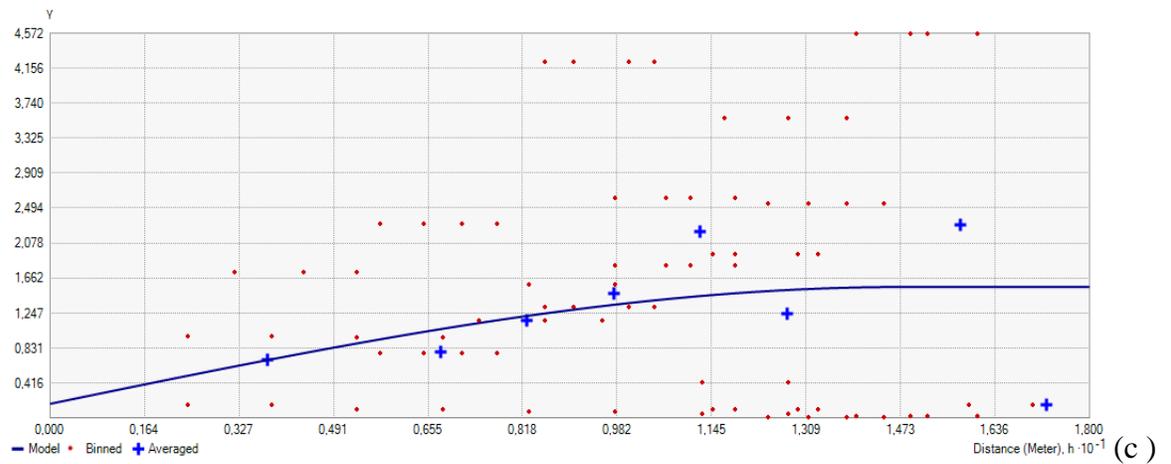
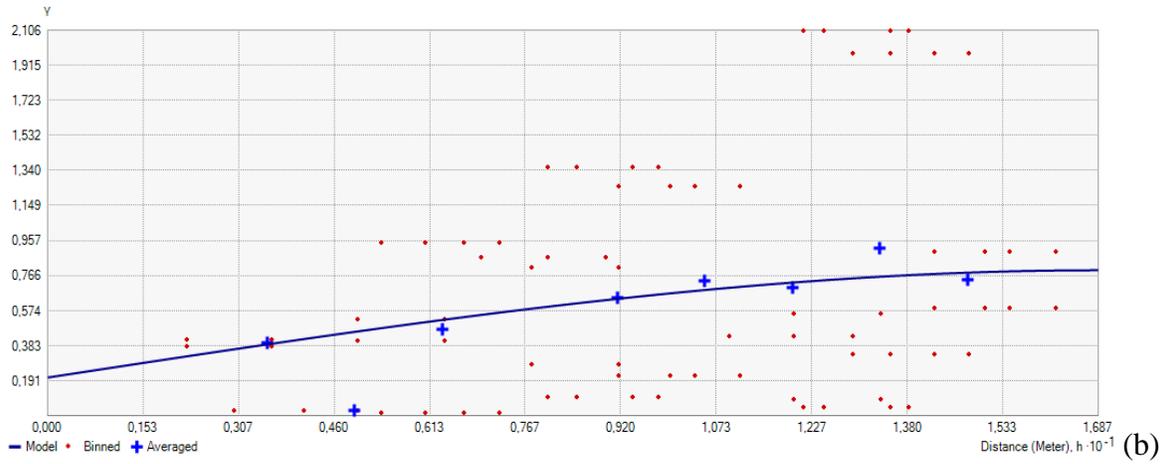
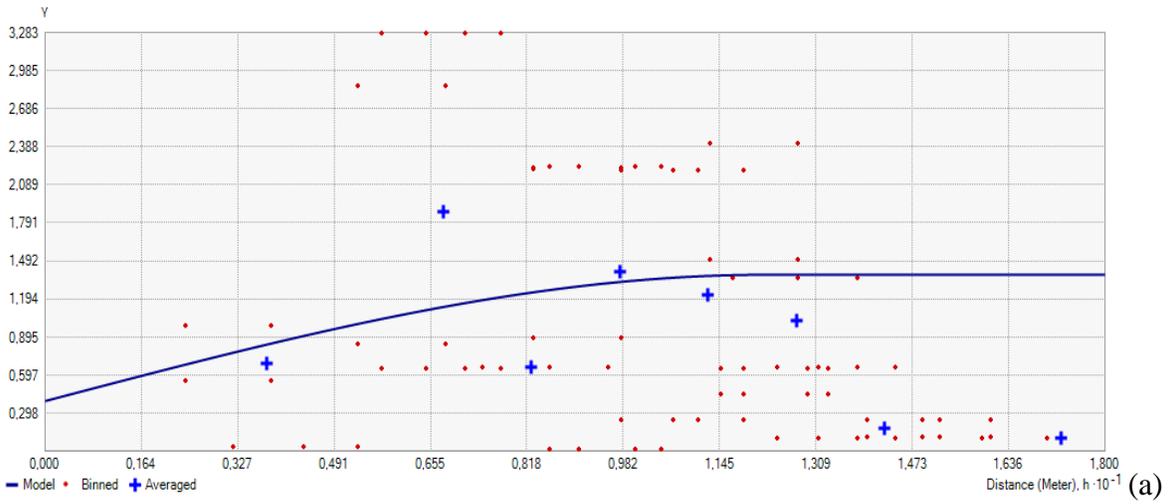


# 25-50 cm

**Anexo 7: Semivariograma de la Arena (%) en un perfil de 50 cm.**

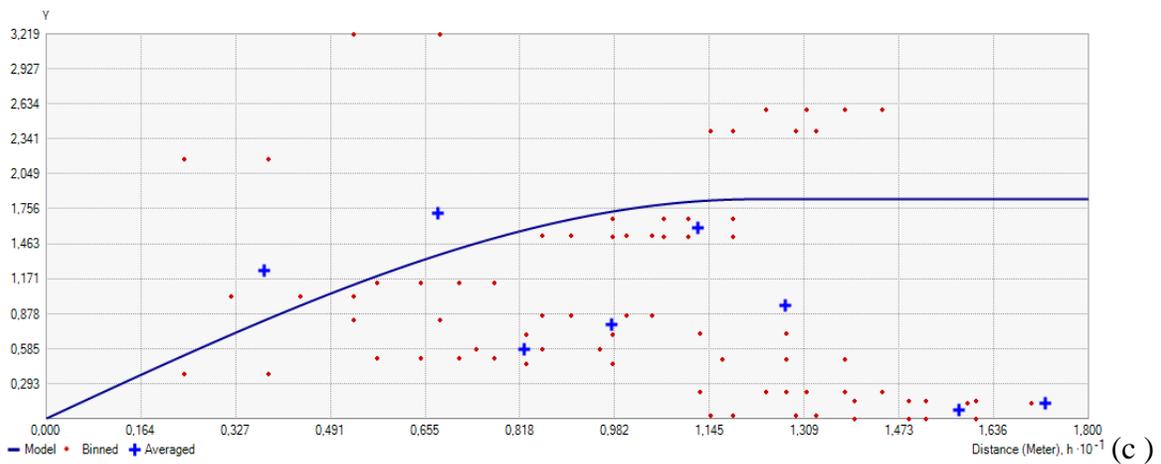
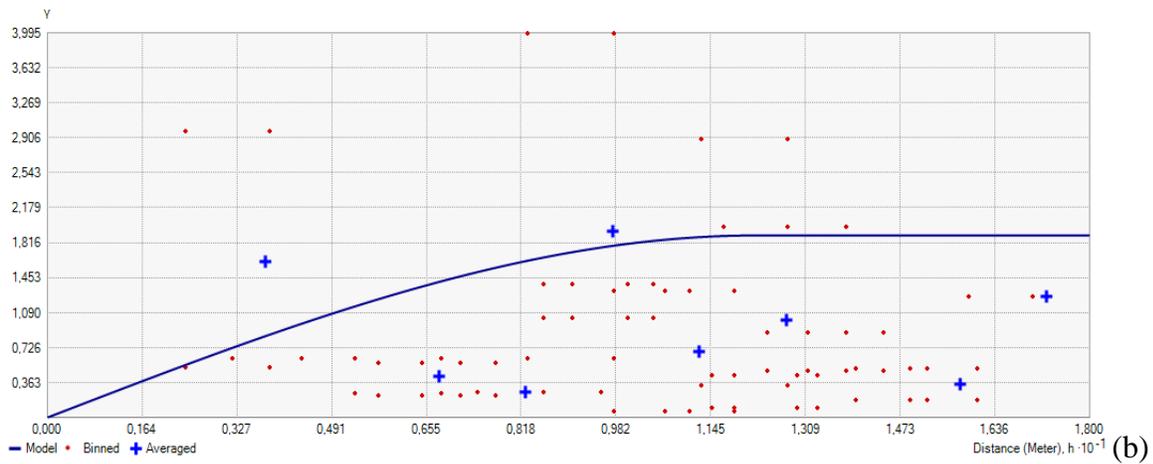
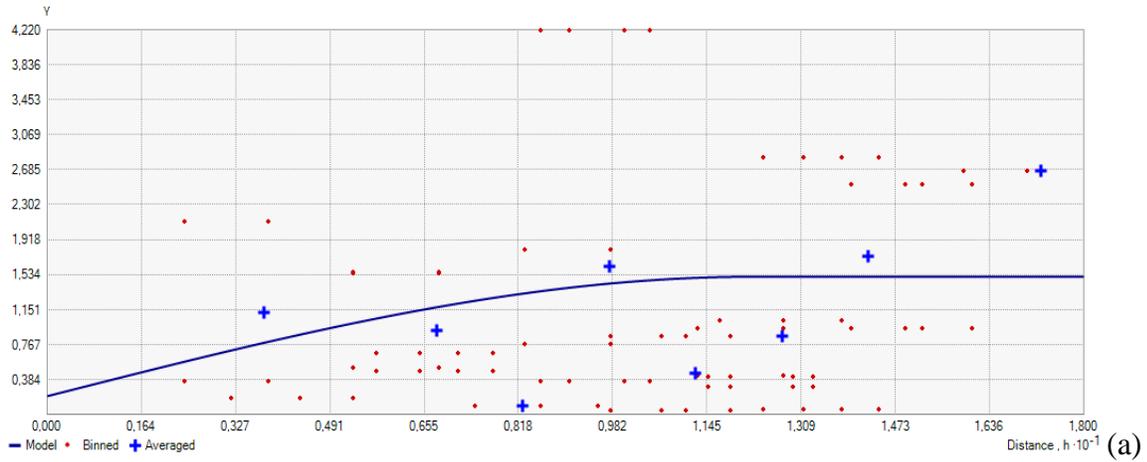


### 0-25 cm

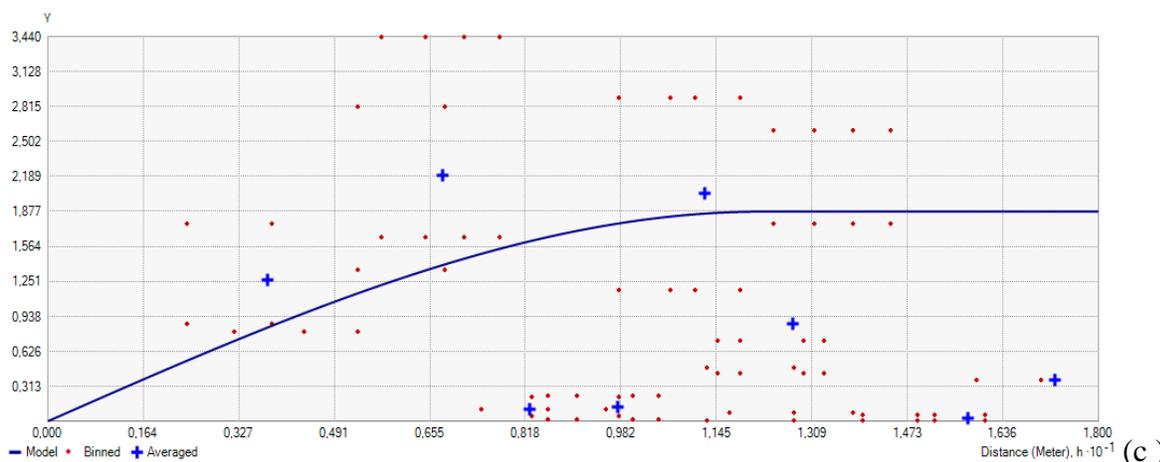
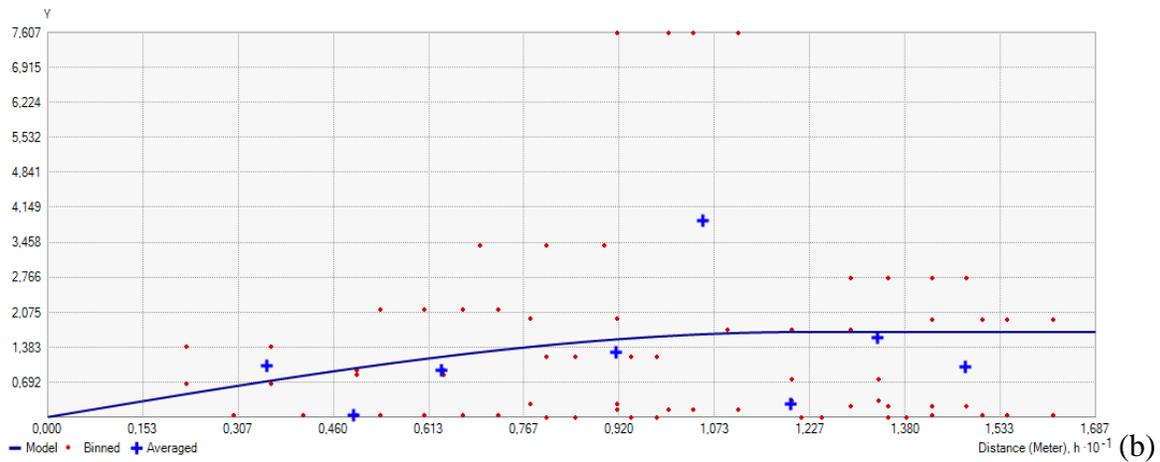
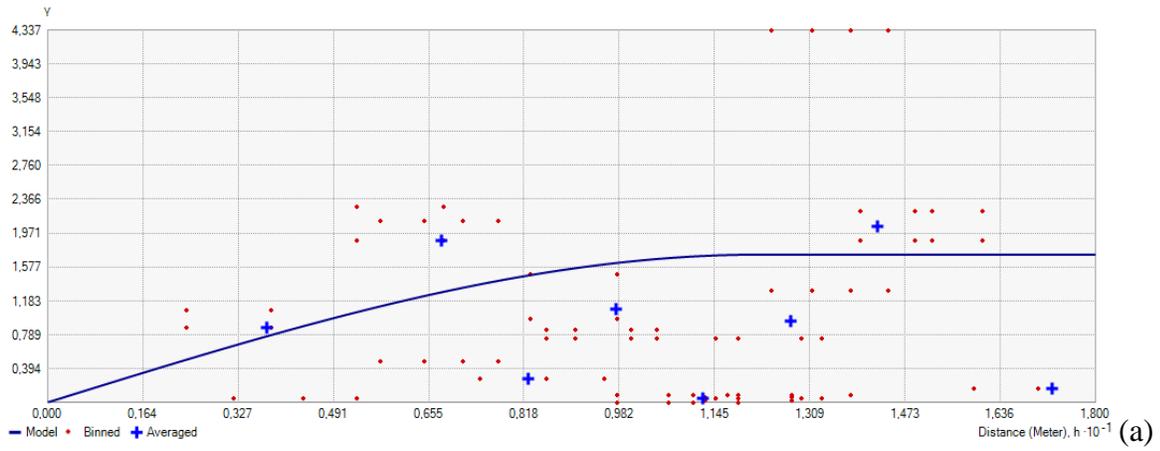


### 25-50 cm

**Anexo 8: Semivariograma de la Porosidad (%) en un perfil de 50 cm.**

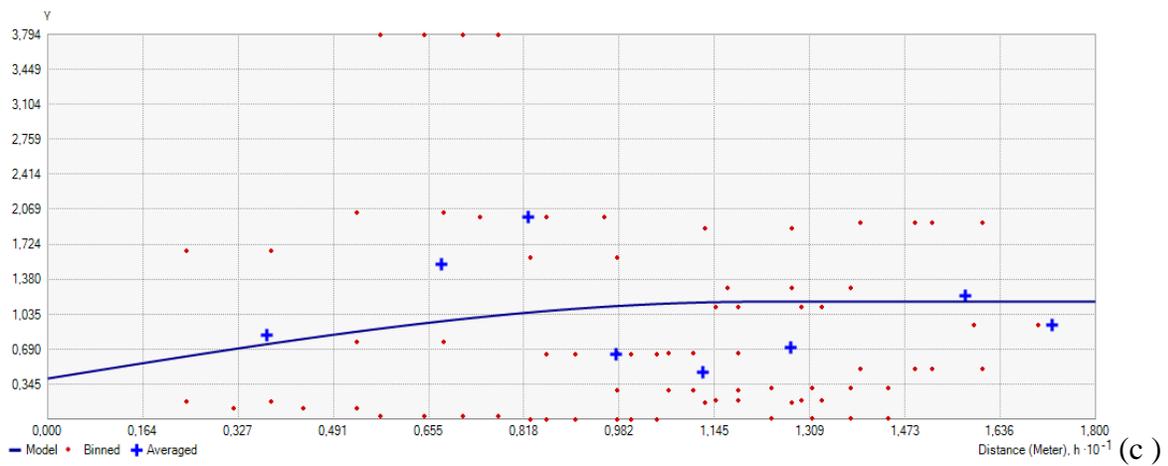
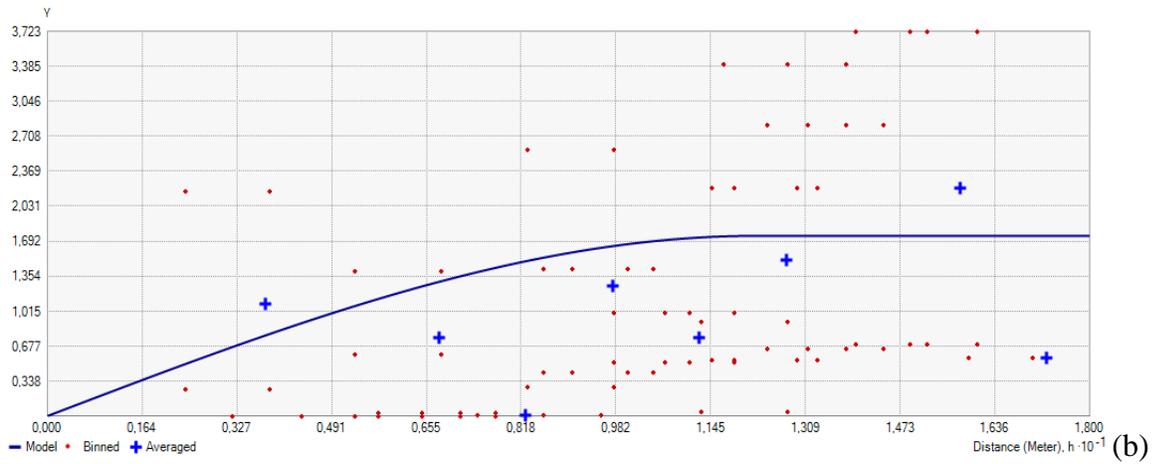
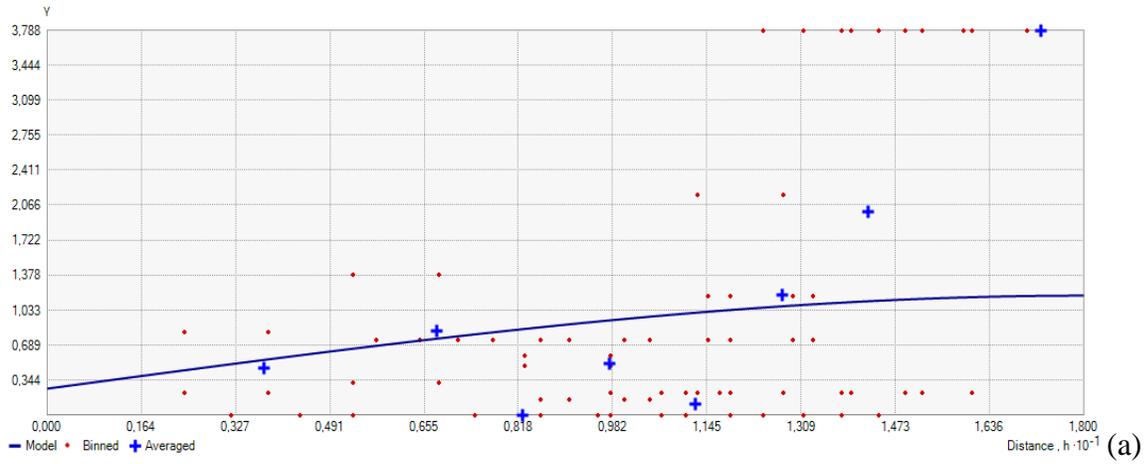


### 0-25 cm

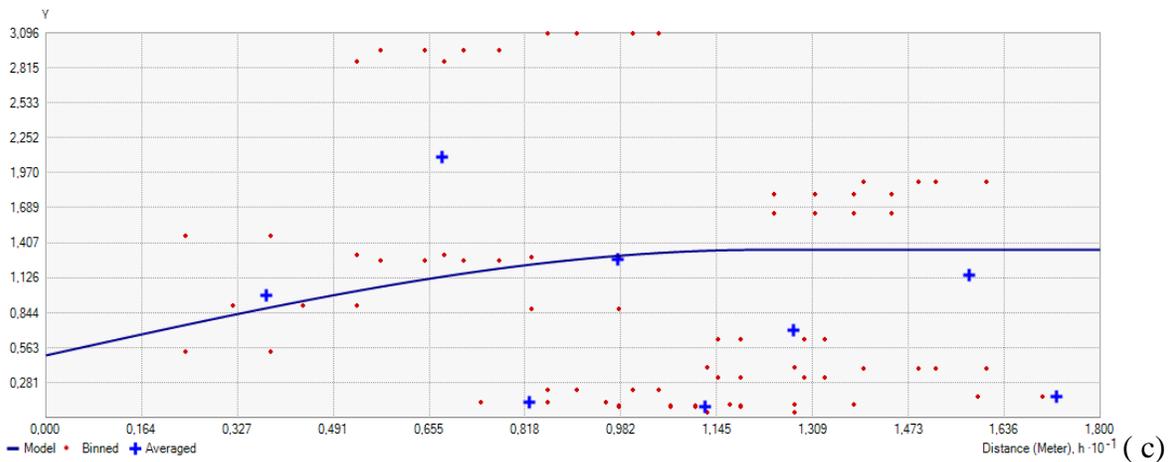
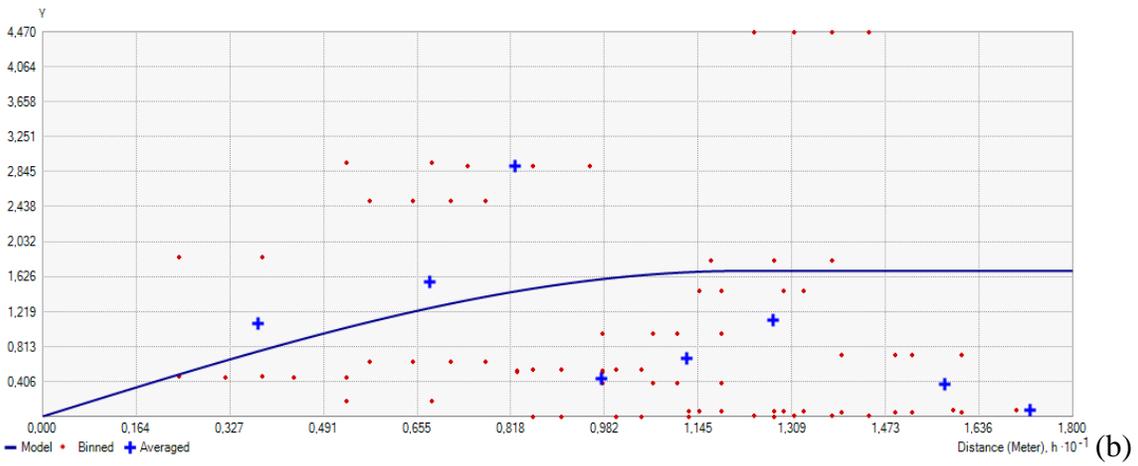
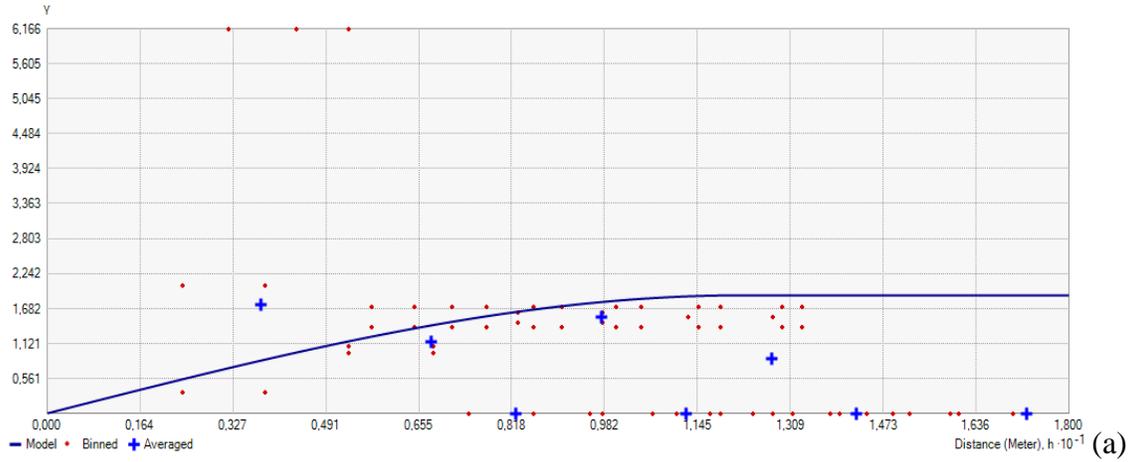


### 25-50 cm

**Anexo 9: Semivariograma de la Humedad Aprovechable en un perfil de 50 cm.**

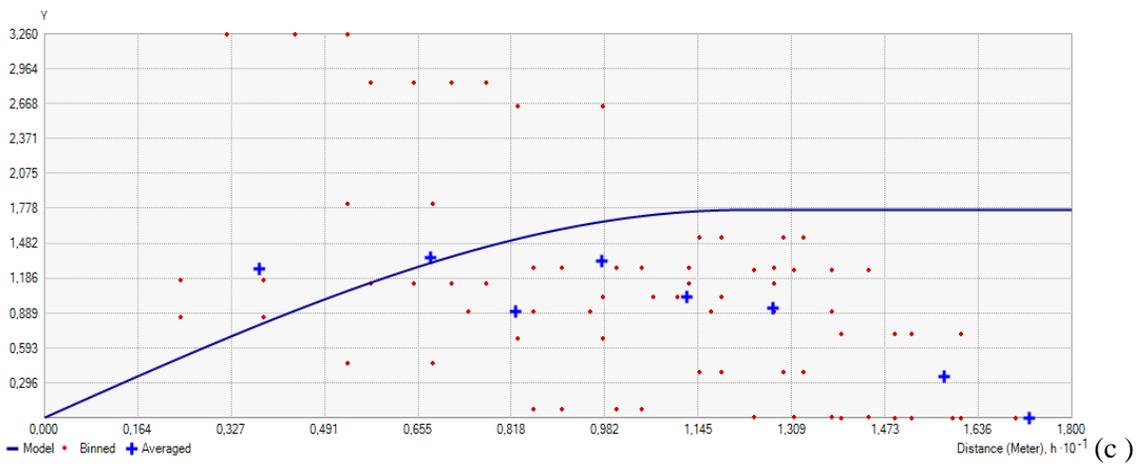
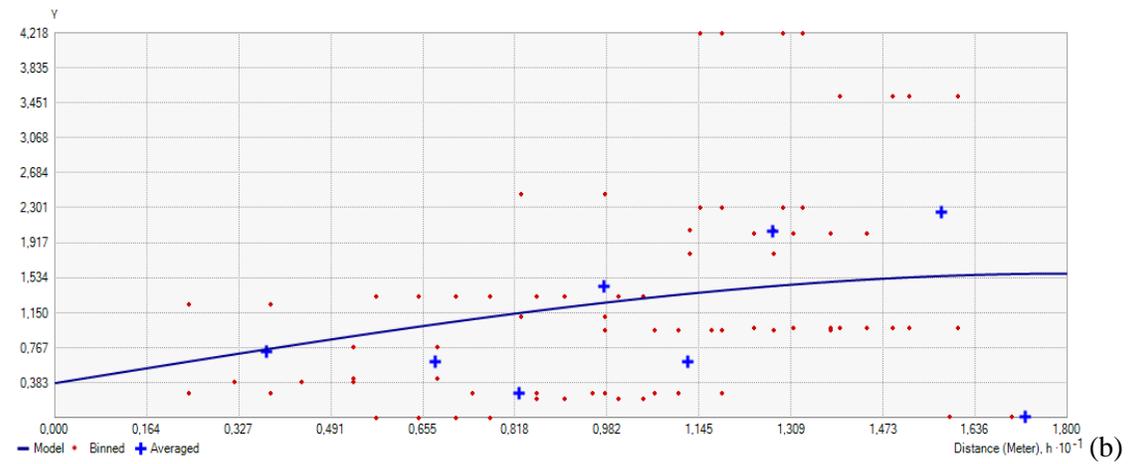
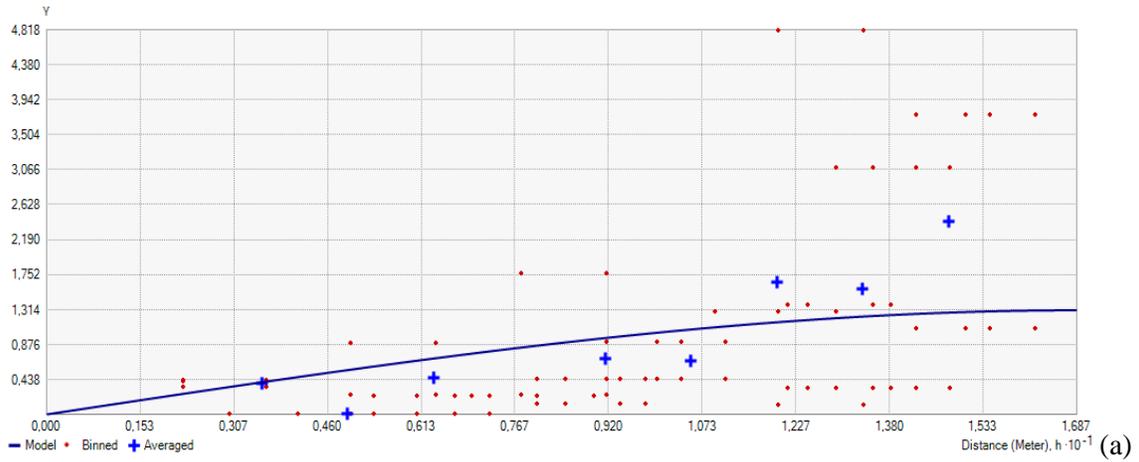


**0-25 cm**

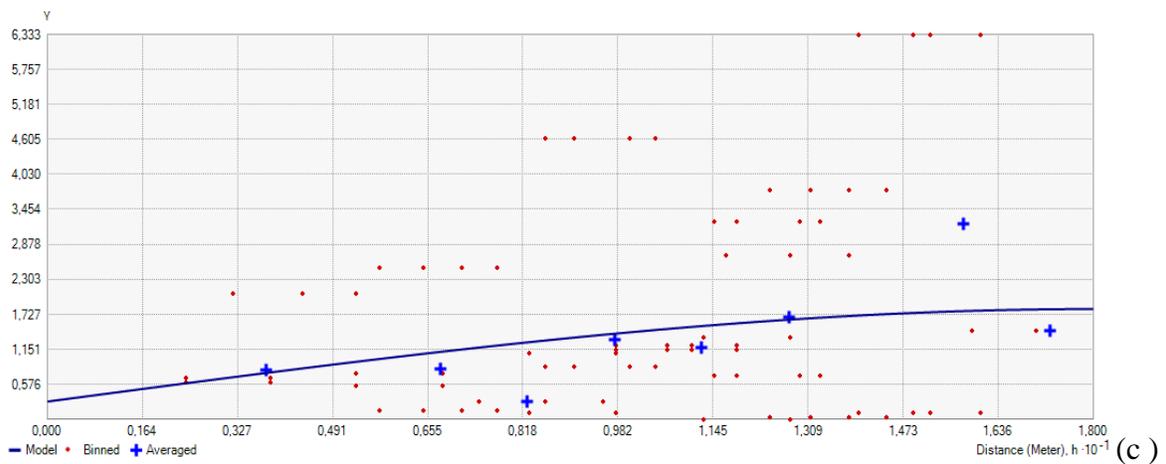
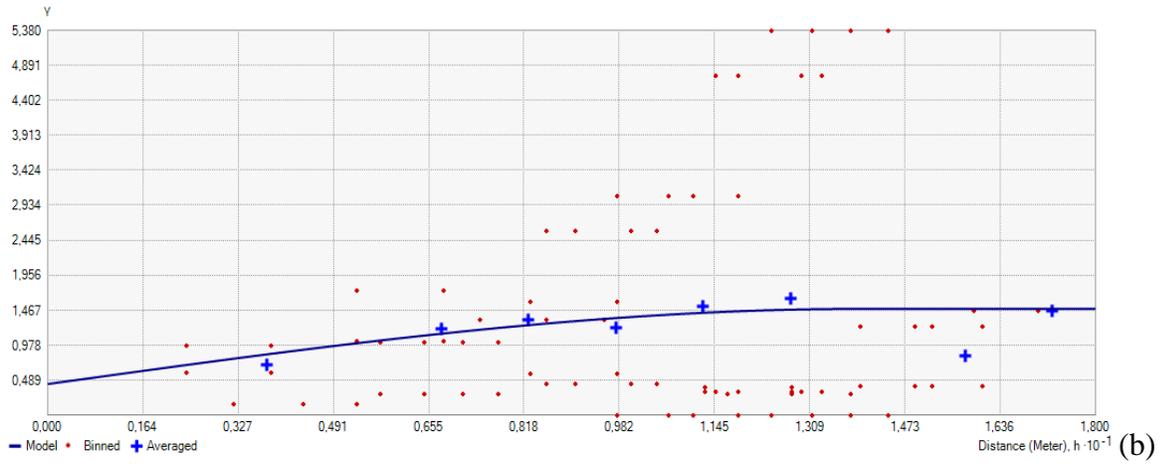
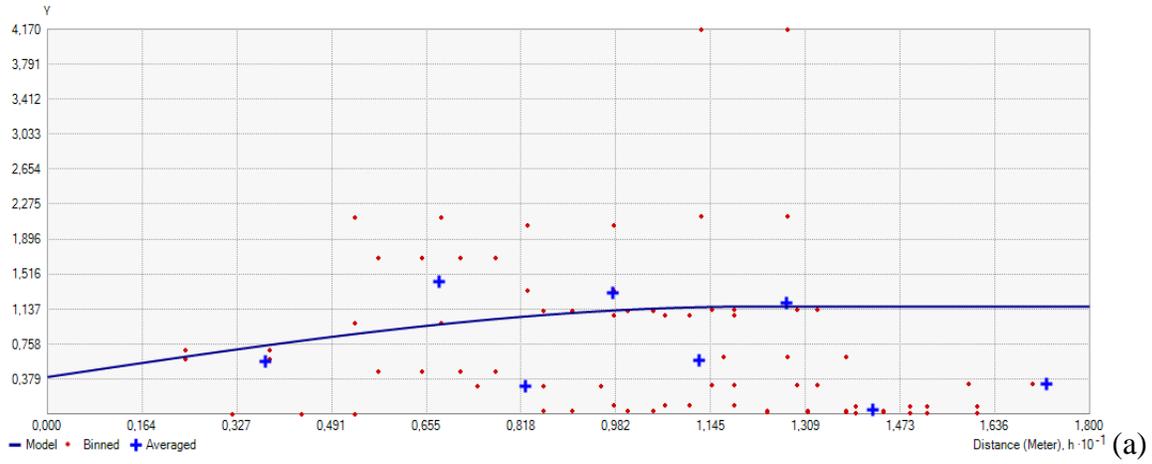


**25-50 cm**

### Anexo 10: Semivariogramas del limo en un perfil de 50 cm.



# 0-25 cm



# 25-50 cm

**Anexo 11:** Calicata para la toma de muestra



**Anexo 12:** Toma de muestras utilizando cilindros metálicos



### Anexo 13: Extracción de la muestra



### Anexo 14: Secado al ambiente de las muestras



**Anexo 15: Determinación de la densidad real**



**Anexo 16: Determinación de la textura**

