

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria
Ingeniería Agronómica



Proyecto Especial de Graduación
Caracterización de la variabilidad espacial de propiedades físicas,
químicas y morfológicas de los suelos del lote Tobiatá de la Escuela
Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras

Estudiante

Gabriel Everardo Morales Aguilón

Asesores

Ricardo Alexander Peña Venegas, Ph.D.

José Adrián Ordoñez Bonilla, M.Sc.

Honduras, julio 2023

Autoridades

SERGIO RODRÍGUEZ ROYO

Rector

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

CELIA O. TREJO RAMOS

Directora Departamento de Ciencia Y Producción Agropecuaria

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Contenido

Índice de Cuadros.....	4
Índice de Figuras	5
Índice de Anexos.....	6
Resumen	7
Abstract.....	8
Introducción.....	9
Materiales y Métodos	13
Localización del Área de Estudio.....	13
Diseño del Muestreo.....	14
Variables Medidas.....	16
Físicas	16
Químicas	17
Morfológicos	17
Procesamiento y Análisis de la Información	18
Resultados y Discusión.....	19
Estadística Descriptiva	19
Análisis de Varianza del Diseño Anidado	22
Análisis de Semivariogramas.....	25
Conclusiones	34
Recomendaciones.....	35
Referencias.....	36
Anexos.....	41

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Estadística descriptiva de los atributos morfológicos del suelo del lote Tobiata, San Nicolás, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras.....	20
Cuadro 2 Análisis de Varianza del Diseño de los atributos morfológicos, físicos y químicos de los suelos del lote Tobiata, San Nicolás, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras.	23
Cuadro 3 Modelos teóricos ajustados a los semivariogramas experimentales para evaluar la variabilidad espacial de los a atributos¥ morfológicos, físicos y químicos de los suelos del lote Tobiata, San Nicolás, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras.	26

Índice de Figuras

Figura 1 Localización del Lote Tobiata en el área del Pivote Central, San Nicolás, Escuela Agrícola Panamericana.	13
Figura 2 Diseño del muestreo anidado para el estudio de variabilidad espacial de suelos en el lote Tobiata, San Nicolás, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras. Se señala cada una de las distancias de muestreo correspondiente a cada nivel, 150 m (N1), 50 m (N3), 20 m (N2), 5 m (N1), respectivamente.	15
Figura 3 Variograma de los atributos morfológicos, físicos y químicos de los suelos del lote Tobiata, San Nicolás, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras.	24
Figura 4 Semivariogramas de los atributos morfológicos, físicos y químicos de los suelos del lote Tobiata, San Nicolás, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras.	27
Figura 5 Validación Cruzada de los atributos morfológicos, físicos y químicos de los suelos del lote Tobiata, San Nicolás, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras.	29
Figura 6 Mapas de Variabilidad espacial de los atributos morfológicos, físicos y químicos de los suelos del lote Tobiata, San Nicolás, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras.	32

Índice de Anexos

Anexos A Perfiles modales	41
Anexos B Descripción de perfiles modales	42
Anexos C Resultados de Laboratorio	43

Resumen

La productividad de los cultivos está condicionada por factores como la variabilidad de los suelos, esta puede ser medida a través de tiempo y el espacio; siendo la variabilidad espacial la que afecta a las características del suelo. Los objetivos del estudio fueron caracterizar la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas, químicas y morfológicas del lote Tobiatá ubicado en el área del Pivote Central, San Nicolás, Escuela Agrícola Panamericana y proponer las distancias óptimas de muestreo de suelos para cada una de las características evaluadas, y para la generación de mapas de variabilidad espacial de suelos. El estudio fue realizado en un área de 11.3 ha con un diseño de muestreo anidado, en el cual se establecieron cuatro distancias de muestreo 150, 50, 20 y 5 m; los valores fueron evaluados a través de estadística descriptiva, análisis de varianza anidado y geoestadística (semivariogramas). Los resultados mostraron que las variables de Profundidad Efectiva (P_E), Resistencia a la Penetración a 300 PSI (R. P. 300 PSI), Densidad Aparente (DAP), Porcentaje de Limo (% Limo) y Porcentaje de Arena (% Arena) presentaron el mayor porcentaje de varianza en 50m, las variables de Profundidad del Primer Horizonte (P_P_H), Porcentaje de Arcilla (% Arcilla) y Carbono Orgánico (CO) en 20m y la variable pH en el 5m; por lo que la distancia de muestreo no debe superar los 50 m. Los semivariogramas que presentaron un mayor r^2 en la validación cruzada fueron Profundidad del Primer Horizonte (P_P_H) (0.83), Densidad Aparente (DAP) (0.80), Porcentaje de Arena (% Arena) (0.66), Porcentaje de Limo (% Limo) (0.50) y pH (0.95), siendo los más precisos para elaborar mapas de variabilidad espacial.

Palabras clave: geoestadística, inceptisoles, muestreo del suelo, variabilidad.

Abstract

Crop productivity is conditioned by factors such as soil variability, which can be measured through time and space; spatial variability being the one that affects soil characteristics. The objectives of the study were to characterize the spatial variability of some physical, chemical, and morphological properties of the Tobiata plot, located in the Central Pivot, San Nicolás, Pan-American Agricultural School, and to propose the optimal soil sampling distances for each of the evaluated characteristics and for the generation of soil spatial variability maps. The study was carried out in an area of 11.3 ha with a nested sampling design, in which four sampling distances were established: 150, 50, 20 and 5 m. The values were evaluated using descriptive statistics, nested analysis of variance and geostatistics (semivariograms). The results showed that the variables of Effective Depth (P_E), Resistance to Penetration at 300 PSI (R. P. 300 PSI), Apparent Density (DAP), Percentage of Silt (% Silt) and Percentage of Sand (% Sand) presented the highest percentage of variance at 50m, the variables Depth of the First Horizon (P_P_H), Percentage of Clay (% Clay) and Organic Carbon (OC) at 20m and the variable pH at 5m; therefore the sampling distance should not exceed 50m. The semivariograms that showed a higher r^2 in the cross-validation were Depth of the first horizon (P_P_H) (0.83), Apparent Density (DAP) (0.80), Percentage of Sand (% Sand) (0.66), Percentage of Silt (% Silt) (0.50) and pH (0.95), being the most accurate to produce spatial variability maps.

Keywords: geoestatistics, inceptisols, soil sampling, variability.

Introducción

La agricultura desempeña un papel fundamental en la sociedad y la economía de los países; aspectos como la seguridad alimentaria, el medio ambiente y el desarrollo económico y social dependen de ella. La agricultura ha experimentado varios cambios significativos a nivel global en las últimas décadas, presionada principalmente por la demanda alimentaria que crece día a día debido al continuo crecimiento poblacional, que según estimaciones de las Naciones Unidas (2022), llegaríamos a alcanzar en el 2050 una población mundial de 9,700 millones. Este cambio constante, ha hecho que las prácticas agrícolas varíen, que se expandan las áreas de producción agrícola y se genere la necesidad de aumentar rendimientos por unidad de área, es decir, maximizar los recursos disponibles para aumentar la productividad. La implementación de nuevas tecnologías como uso de semillas mejoradas, insumos de mayor eficiencia, maquinaria, sensores, computadores, uso de datos, entre otros, ha permitido grandes avances en la producción de alimentos. Sin embargo, la modernización de las prácticas agrícolas genera nuevos desafíos, principalmente en lo que se refiere a sustentabilidad ambiental y económica durante el proceso de producción; en respuesta a estos nuevos desafíos se ha generado tecnología que permite desarrollar técnicas que cuantifiquen y manejen diferencialmente la variabilidad natural del área de producción (Mantovani et al. 2006).

La agricultura de precisión, la cual es un concepto muy popular en la actualidad, es un conjunto de técnicas orientadas a la optimización del uso de insumos agrícolas (semillas, químicos y correctivos) en función de la cuantificación de la variabilidad espacial y temporal de la producción agrícola (Guachún Calderón 2022). Una correcta optimización se logra a través la correcta distribución de insumos, dependiendo del potencial y la necesidad de cada una de las áreas de manejo (Peralta et al. 2015). La agricultura de precisión no consiste solamente en medir la variabilidad existente en el área, sino también en adoptar prácticas administrativas en función de esa variabilidad (Mantovani et al. 2006).

El suelo es heterogéneo por naturaleza, por ende, una de las características principales que presenta el suelo en sus propiedades es la heterogeneidad, la cual, puede ser clasificada como de baja o alta magnitud, afectando las predicciones y el manejo que se haga con respecto a las características del suelo (Jaramillo J. 2002). Las características que presenta el suelo y el cultivo varían en relación al tiempo y el espacio (distancia y profundidad) (Vieira y Falci Dechen 2010). La variabilidad depende de múltiples factores, siendo la génesis del suelo la principal causa presente en las propiedades del suelo, debido a la interacción de los cinco procesos formadores de suelo con una gran variedad de procesos pedogenéticos, dando como resultado una gran variedad de suelos y una variedad mucho mayor en sus características físicas, químicas y biológicas (Jaramillo 2011). Las prácticas agrícolas son otra de las causas de la variabilidad en el suelo, ya que afectan de forma inevitable las propiedades físicas del suelo y las concentraciones de nutrientes que las plantas pueden absorber de este, lo que su vez afecta el potencial de optimizar y maximizar la producción de los cultivos (Peukert et al. 2016). Ha sido reportado que esta variabilidad depende de la propiedad evaluada, siendo más variables las características químicas que las físicas (Acevedo et al. 2015; Ciarlo et al. 2020); de igual forma, el suelo presenta una mayor variabilidad cuando ha sido sometido a uso agropecuario que bajo sus condiciones naturales (Jaramillo J. 2012).

La variabilidad del suelo puede medirse en el tiempo y el espacio, siendo la variabilidad espacial el principal tipo de variabilidad que más afecta a los suelos (Jaramillo Jaramillo 2015; Arciniegas Rojas y Gomez Sanchez 2018) , por lo cual, se ha trabajado intensamente en la adopción y adaptación de nuevas metodologías que contribuyan al estudio de dicha variabilidad, con la finalidad de mejorar el manejo del suelo y con ello tener una mayor eficiencia y rentabilidad en las producciones agropecuaria, así como prácticas que cumplan y contribuyan con las nuevas demandas ambientales (Jaramillo J. 2012).

La variabilidad de las características del suelo ha sido estudiada tradicionalmente a través de levantamiento de suelos, lo cual busca reducir áreas muy extensas en otras más pequeñas, pero más

homogéneas (Webster 1985). Sin embargo, en la actualidad se han estudiado y utilizado técnicas cuantitativas de mayor exactitud, basadas en la geoestadística, las cuales permiten hacer un estudio de las características y mapear su comportamiento de una mayor precisión que las técnicas tradicionales (Alemán Montes et al. 2019). La geoestadística es una rama de la estadística que tiene sus orígenes en el campo de la minería y fue propuesta por Matheron en 1962; y se basa en observar el comportamiento, ya sea variable o continuo, que posee una variable en el espacio, determinando a través de herramientas si la variable presenta una estructura particular dentro del espacio estudiado (Villarreal 2018).

La aplicación de la geoestadística requiere considerar muchos aspectos, uno de ellos es la distancia de muestreo en relación con la escala espacial de variación (Webster et al. 2006), es decir, realizar los muestreos de suelo a determinadas distancias para obtener la dependencia espacial de la variable que en estudio (Córdova et al. 2020). El intervalo de distancia en el cual una variable esta espacialmente relacionada se denomina "rango", el cual es definido como la distancia en el área en la cual las muestras se vuelven independientes, es determinado por el tipo de suelo y para cada propiedad de este que se desee analizar, esto quiere decir que la intensidad (distancia) de muestreo va a variar dependiendo de la propiedad o tipo de suelo a estudiar (Martínez y Zinck 1994; Gho 2004). La dependencia espacial es muy importante muy importante para describir la variabilidad de las características del suelo, ya que ella indica el intervalo de muestreo óptimo; sin embargo, la obtención de muestras espaciales dependientes para la posterior interpolación y generación de mapas se considera una gran limitante en los estudios de variabilidad espacial (Córdova et al. 2020).

Según Jaramillo J. (2012), las técnicas utilizadas con mayor frecuencia para medir la variabilidad espacial son el diseño anidado, la regresión y el análisis de semivarianza. El diseño anidado es un tipo de muestreo que consta en dividir un área en submuestras que a su vez se dividen en otras unidades de muestreo más pequeñas. Usa tablas de números al azar para seleccionar unidades a muestrear en cada nivel (Peña Venegas 2006). Para Jaramillo J. (2002) el diseño anidado es un método

que permite saber la distancia aproximada entre muestras que inducen a mayor variabilidad de los valores analizados. La selección de la muestra se basa en la aleatorización y en la dirección, y garantiza que cada muestra tenga la misma probabilidad de ser seleccionada. Además, este tipo de diseño de muestreo permite realizar un estudio y explorar varias distancias simultáneas que han sido elegidas basándose en factores que podrían influir en los procesos fisicoquímicos que se quieren estudiar (Córdova et al. 2020).

Debido a las necesidades que tiene Zamorano de avanzar en procesos de agricultura de precisión, los objetivos de este estudio fueron: caracterizar la variabilidad espacial de algunas propiedades físicas, químicas y morfológicas del lote Tobiatá ubicado en el área del Pivote Central y proponer las distancias óptimas de muestreo de suelos para cada una de las características evaluadas, para la generación de mapas de variabilidad espacial de suelos.

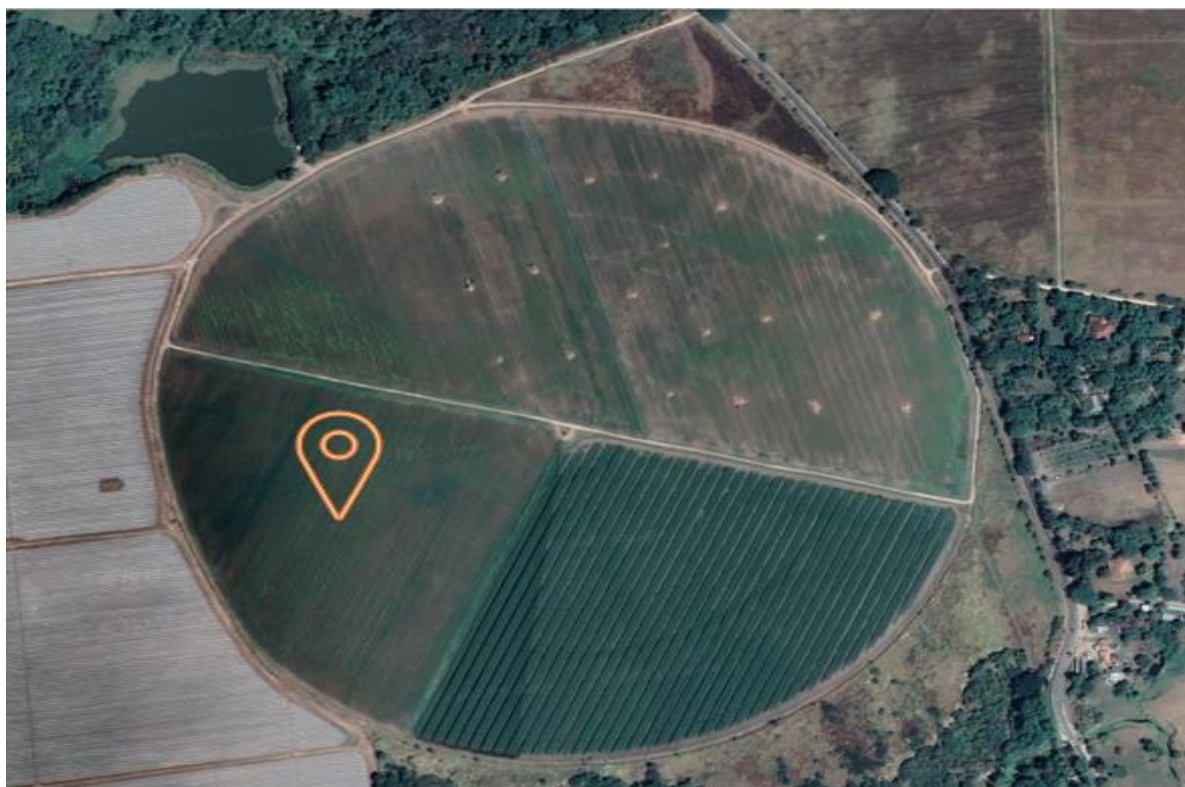
Materiales y Métodos

Localización del Área de Estudio

Para el desarrollo del estudio se seleccionó el lote Tobiatá, ubicado a $13^{\circ} 59'41$ de latitud norte y $87^{\circ} 00'18$ de longitud oeste, en el área del Pivote Central, de la Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano (Figura 1), ubicada en el departamento de Francisco Morazán, Honduras; el cual, tiene una extensión de 11.3 hectáreas aproximadamente.

Figura 1

Localización del Lote Tobiatá en el área del Pivote Central, San Nicolás, Escuela Agrícola Panamericana.



El área de estudio se localiza a 800 msnm y presenta una temperatura promedio anual de 26°C , con valores en promedio para el día y la noche que oscilan entre 23.9°C a 29.4°C . La precipitación media anual es de 1100 mm bajo un régimen bimodal, y una humedad relativa mensual de 77,5%. Esta área se ha utilizado en los últimos años para la producción de granos como maíz, sorgo y frijol (Hernández Conejo 2020).

El suelo en esta área presenta diversas características. Según resultados obtenidos por Hernández Conejo (2020), el lote de Tobiata presenta texturas franco-arcillosas, con resistencias a la penetración entre 1.9 y 2.5 kg/cm² y una fertilidad variable. Las características particulares de los suelos del área de estudio son descritas como parte de los resultados del presente trabajo.

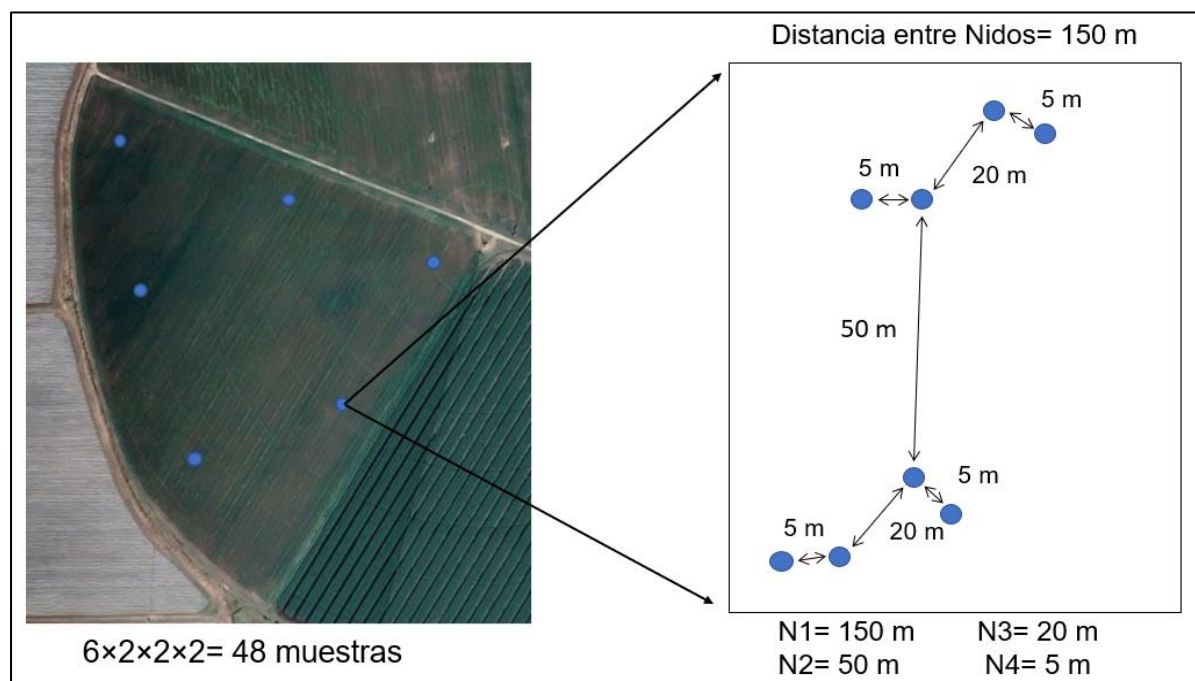
Diseño del Muestreo

La investigación se realizó en un área de 11.3 ha. El diseño corresponde a un muestreo anidado para el cual se definieron cuatro niveles correspondientes a las distancias de muestreo de 4, 20, 50 y 150 m aproximadamente (Figura 2). Las distancias son arbitrarias, y se seleccionaron con base en los criterios descritos por Jaramillo J. (2002) y los resultados de estudios anteriores adelantados por Ovalles y Rey B. J. (1995); Madero (2002); Lozano (2004); Rubiano (2005); Peña Venegas (2006) y Peña R et al. (2009), con algunos ajustes dada la forma particular del lote. El número de repeticiones en el primer nivel de 150 m de distancia de muestreo fue de seis (6); los demás niveles presentaron dos replicas, resultando una factorial de $6 \times 2 \times 2 \times 2 = 48$ sitios en los cuatro niveles que correspondieron al número total de puntos a muestrear (Figura 2).

Para la localización de los puntos de muestreo se utilizó un mapa del área obtenido del software Google Earth Pro, donde fueron seleccionados seis puntos al azar, teniendo en cuenta una distancia aproximada de 150 m entre los puntos que corresponden al nivel 1 (N1) (Figura 2). En cada uno de los puntos seleccionados se midió un trayecto de 50 m con una dirección al azar, para seleccionar los puntos del nivel 2 (N2), seguidamente se midieron dos transectos de 20 m en el nivel 3 del muestreo (N3) y cuatro de 5 m en el nivel 4 del muestreo (N4) para conformar cada transecto (Figura 2).

Figura 2

Diseño del muestreo anidado para el estudio de variabilidad espacial de suelos en el lote Tobiatá, San Nicolás, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras. Se señala cada una de las distancias de muestreo correspondiente a cada nivel, 150 m (N1), 50 m (N3), 20 m (N2), 5 m (N1), respectivamente.



Para la obtención del perímetro de la finca y la ubicación de cada uno de los puntos de muestreo en el campo se utilizó un GPS (Global Positioning System) y cada uno de los datos se expresó en el sistema UTM (Universal Transverse Mercator), en metros. De esta forma cada muestra colectada y el perímetro contaron con sus correspondientes coordenadas cartesianas X y Y, necesarias para el análisis espacial cuantitativo.

Una vez identificados los puntos a muestrear se realizaron cajuelas de 50 × 50 cm hasta una profundidad de 50 cm, barrenando dentro de la cajuela hasta 100 cm aproximadamente, esta última dimensión varió la pedregosidad presente en la zona, con el fin realizar la caracterización morfológica de cada punto y complementar los datos necesarios para clasificar los suelos taxonómicamente. Las muestras para caracterización en laboratorio fueron tomadas dentro de la cajuela a una profundidad de 0 a 20 cm. También se realizó la descripción detallada del perfil del suelo, para ello, se seleccionó

un punto representativo dentro del lote. Esta descripción se hizo a través de una (1) calicata de 120 cm de ancho por 170 cm de largo y 82 cm de profundidad, esta última dimensión debido a la limitación por pedregosidad.

Variables Medidas

Físicas

Densidad Aparente (DAP) de 0 a 20 cm de Profundidad en g.cm^{-3} .

Método del cilindro biselado. La densidad aparente se define como la masa de la unidad de volumen de suelo seco (105°C). Este volumen incluye no solo los sólidos, sino que también incluye los poros del suelo, por lo cual la densidad aparente refleja la porosidad que presenta el suelo. Saber la densidad aparente es muy importante, debido a que es un indicador de la calidad del suelo, a través de ella se puede saber si el suelo presenta limitantes con el crecimiento de las raíces, problemas de infiltración del agua y la aireación del suelo (FAO 2009). Un método muy utilizado para la determinación de la densidad aparente es el de los cilindros biselados, este método consiste en introducir el cilindro completamente en el suelo, ayudado por martillo, luego sacar el cilindro y remover las capas de suelo sobrantes de los extremos, seguidamente pesar la muestra, y secarla en muestra a 105°C durante 24 horas y proceder a pesar las muestras; con los siguientes datos tomados se calcula la densidad aparente.

Resistencia a la Penetración (R. P.).

A través de un Penetrómetro de Barra con un cono de 30° y 2 cm^2 , el cual mide la resistencia a la penetración en libras por pulgada cuadrada (PSI), en esta variable se midió la profundidad a la que se encontraba una resistencia de 300 PSI. La resistencia a la penetración del suelo es un indicador de la salud del suelo, ya que a través de él se puede determinar el grado de compactación que posee el suelo, y con ello tomar decisiones precisas en cuanto al manejo que requiere el suelo.

Textura.

Se estimó a través del método de Bouyoucos, que incluye el porcentaje de arcilla, limo y arena. La textura del suelo influye tanto en las características físicas y químicas del suelo, como en el drenaje y la retención del agua; determinarla contribuye a tomar mejores decisiones en la producción y la conservación del suelo (Fernández Martínez et al. 2022). El método consiste en la medición de limo y arcilla en el efecto del tamaño de la partícula en velocidades diferenciales de sedimentación dentro de una columna de agua.

Químicas

pH 1:1 (pH): Potenciómetro.

El pH del suelo es muy importante determinarlo, ya que influye en distintos factores de la actividad del suelo que afectan el crecimiento de las plantas, como la disponibilidad de los nutrientes del suelo para las plantas, los micro y macronutrientes del suelo están disponible para su absorción en diferentes niveles de pH (FAO 2021). El pH se midió por potenciometría en suspensión de suelo y agua 1:1.

Carbono Orgánico (CO).

A través del método Walkley and Black. La cantidad de carbono orgánico que presenta el suelo es muy importante, debido a que de ello depende la persistencia de la materia orgánica y las distintas actividades del suelo relacionadas a ello (Lefèvre et al. 2017). El método de Walkley and Black se basa en calcular la materia orgánica oxidable a partir de la cantidad de ion cromo (Cr^{3+}) formado, a través de un método de titulación.

Morfológicos

Espesor del horizonte superficial (cm) y Profundidad Efectiva (cm).

Estas dos variables se midieron por medio de una cinta métrica y con ayuda de un cuchillo pedológico. Establecer estas variables es muy importante en un suelo, ya que a través de esto se puede determinar el manejo que requiere el suelo para establecer un cultivo.

Procesamiento y Análisis de la Información

En el análisis estadístico se utilizó la estadística descriptiva para evaluar las tendencias de los valores de cada una de las variables medidas, para ello se determinó la media, la desviación estándar, la varianza, el coeficiente de variación, la mediana, la asimetría, la curtosis y los valores máximos y mínimos de las variables que serán estudiadas; para ello se utilizó el programa SAS 9.4 (SAS Institute Inc. 2021). Además, se realizó un análisis de varianza del muestreo anidado con el objetivo de estimar los porcentajes de varianza aportados por cada nivel (distancia de muestreo) a la varianza total.

Una vez obtenido el análisis de varianza anidado se procedió a la elaboración de los semivariogramas para cada una de las variables analizadas a través del software QGIS Desktop 3.24.3. El variograma es la representación gráfica del comportamiento de las varianzas acumuladas con respecto a la distancia. Según Ovalles (1991) establece que la distancia donde se observa un cambio marcado en la pendiente de la curva constituye la distancia que mejor resuelve el patrón de variación de los suelos.

Los resultados obtenidos de la investigación fueron discutidos a través de estadística clásica y geoestadística, ya que según Viera (2002) no puede separarse una de la otra, debido a que no todas las variables pueden ser explicadas a través de geoestadística si no cumplen con los criterios de variables regionalizadas.

Resultados y Discusión

Los suelos del área en la que se realizó el estudio están caracterizados por poseer una textura franco arenosa a franco arcillo arenosa; con predominio de la textura arenosa (Anexo C), de profundidad efectiva superficial limitada por la pedregosidad que sobresale en el área. Son suelos bien drenados favorecidos por la textura que predomina el área (Anexo C). En función de la descripción de campo (Anexo A y B) y en los análisis realizados (Anexo C), este suelo fue clasificado taxonómicamente hasta la categoría de orden como Inceptisol y suborden como Ustepts.

Estadística Descriptiva

En los análisis de suelos convencionales, tienden a reportarse únicamente propiedades químicas y la textura como único atributo físico y en algunas ocasiones datos de densidad aparente; sin embargo, en la mayoría de los casos no se caracterizan adecuadamente las propiedades físicas del suelo (Vargas Rojas 2004).

En el Cuadro 1 se presentan las estadísticas descriptivas de las variables morfológicas estudiadas: profundidad del primer horizonte (P_P_H) y profundidad efectiva (P_E); de las variables físicas estudiadas: resistencia a la penetración a 300psi (R. P. 300psi), densidad aparente (DAP), porcentaje de arena (% arena), porcentaje de limo (% limo), porcentaje de arcilla (% arcilla); y de las variables químicas: carbono orgánico del suelo (COS) y pH.

La profundidad del primer horizonte (P_P_H) presenta un promedio de 23.73 cm a lo largo de la superficie del lote, estos resultados están dentro del rango propuesto por Baridón (2019) y son similares a los resultados obtenidos por Vidal et al. (2019) en suelos vertisoles; pero bajos comparados con los obtenidos por Peña R et al. (2009) en un inceptisol. La profundidad efectiva (P_E) presenta un promedio de 75.74 cm con un rango de variación de 48 cm, clasificando este suelo como moderadamente profundo y fuera del rango de profundidad óptima (80 cm a 120 cm) según los parámetros propuestos por Gauggel Rivas et al. (2009); los datos obtenidos son similares a los encontrados por Barahona Flores (2002) en el lote de San Nicolas a colindancias del lote estudiado y

con los datos obtenidos por Vargas Curaca y Céspedes Paredes (2019) en el altiplano central de Bolivia, pero menores en comparación con los datos obtenidos por Fernández Diaz (2003) en los lotes de Zorrales y Monte Redondo a cercanías del lote estudiado.

Cuadro 1

Estadística descriptiva de los atributos morfológicos del suelo del lote Tobiatá, San Nicolás, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras.

Atributo [¥]	Media	Desviación estándar	Coefficiente de Variación	Mediana	Asimetría	Curtosis	Min.	Max.
P_P_H (cm)	23.729	3.907	0.141	23.000	0.045	-0.079	16.000	32.000
P_E (cm)	75.740	10.651	0.165	75.000	0.250	0.737	50.000	98.000
R. P. 300 psi (cm)	30.104	9.863	0.328	29.000	0.552	-0.300	16.000	55.000
DAP (Kg/cm ³)	1.254	0.109	0.087	1.267	0.548	0.028	1.041	1.523
% Arena	56.833	3.932	0.069	58.000	-0.861	-0.350	48.000	62.000
% Limo	23.667	3.069	0.130	22.000	0.477	-0.632	18.000	30.000
% Arcilla	19.500	1.516	0.078	20.000	0.153	-0.660	16.000	22.000
CO (%)	1.104	0.140	0.127	1.110	0.248	0.041	0.810	1.430
pH	5.289	0.268	0.051	5.195	0.627	-0.775	4.920	5.860

Nota. [¥] Atributos morfológicos: profundidad del primer horizonte (P_P_H) y profundidad efectiva (P_E); físicas: resistencia a la penetración a 300psi (R. P. 300psi), densidad aparente (DAP), arena (% arena), limo (% limo), arcilla (% arcilla); y de las variables químicas: carbono orgánico (CO) y pH.

La profundidad del primer horizonte (P_P_H) presenta un promedio de 23.73 cm a lo largo de la superficie del lote, estos resultados están dentro del rango propuesto por Baridón (2019) y son similares a los resultados obtenidos por Vidal et al. (2019) en suelos vertisoles; pero bajos comparados con los obtenidos por Peña R et al. (2009) en un inceptisol. La profundidad efectiva (P_E) presenta un promedio de 75.74 cm con un rango de variación de 48 cm, clasificando este suelo como moderadamente profundo y fuera del rango de profundidad óptima (80 cm a 120 cm) según los parámetros propuestos por Gauggel Rivas et al. (2009); los datos obtenidos son similares a los encontrados Barahona Flores (2002) en el lote de San Nicolás a colindancias del lote estudiado y con los datos obtenidos por Vargas Curaca y Céspedes Paredes (2019) en el altiplano central de Bolivia,

pero menores en comparación con los datos obtenidos por Fernández Diaz (2003) en los lotes de Zorrales y Monte Redondo a cercanías del lote estudiado.

Los datos obtenidos para resistencia a la penetración a una fuerza de 300 psi (R. P. 300 psi) presenta un promedio de la profundidad a la que se puede observar de 30.10 cm, presentando un rango de profundidades tan superficiales como 16 cm a más profunda como 55 cm; estos datos son superiores a los encontrados por Hernández Conejo (2020) en el mismo lote evaluado; sin embargo, esta tendencia de valores mayores encontrados en las capas superficiales es similar a la hallada por Forsythe W. et al. (2005); Stancovicová et al. (2008) y Henríquez et al. (2011). La densidad aparente (DAP) en promedio es de 1.25 kg cm^{-3} , este dato determina que es un suelo no compactado a la profundidad de 0-20 cm, según lo propuesto por Domínguez Masís (2001), quien establece que suelos con $\text{DAP} < 1.4 \text{ Kg cm}^{-3}$ son suelos no compactados y suelos con $\text{DAP} > 1.6 \text{ Kg cm}^{-3}$ son suelos compactados; además, coincide con los resultados obtenidos por Escobar Perea et al. (2021).

El suelo se clasificó como franco arenoso; sin embargo, a pesar de ser el dominante del área, esta propiedad presenta una alta variabilidad. El dominio textural lo ejerce la fracción arena con un porcentaje promedio de 56.83%, con un mínimo de 48 y un máximo 62%; las siguientes dos fracciones presentan un promedio de 23.66 y 19.50%, en cuanto a limo y arcilla respectivamente. La fracción arena condiciona las características químicas que posee el suelo, como los niveles de carbono orgánico y las concentraciones de nutrientes, así como sus propiedades físicas y biológicas (Zhao et al. 1998; Zhong et al. 2007; Jiao 2010; Zhang et al. 2010).

El carbono orgánico del suelo (COS) presenta un promedio de 1.10%, con un porcentaje mínimo de 0.81% y un máximo de 1.43%, estos porcentajes son similares a los encontrados por Barahona Flores (2002) y Fernández Diaz (2003) en los lotes de San Nicolás, Monte Redondo y Zorrales, pero menores comparado con los encontrados por Guerra-Hernández et al. (2021) en un suelo inceptisol en México; los porcentajes bajos se pueden atribuir a la fracción de arena que predomina en la zona según lo establecido por Li et al. (2012) pero también al manejo de los suelos, dominado

principalmente por el monocultivos de cereales y frijol; con el bajo porcentaje de COS se establece que el porcentaje de materia orgánica (MO) en el suelo también es bajo, afectando los diversos procesos del suelo que dependen de ella como, la formación de los agregados y la estabilidad estructural al unir las arcillas, favorecer la penetración y la retención de agua , promover el intercambio gaseoso, disminuir la erosión, aumentar las reservas de nutrientes y favorecer la absorción de estos, dando como resultado una disminución en la productividad y el rendimiento de los cultivos (Arévalo et al. 2023). Los valores de pH oscilan en un rango de 4.92 (muy fuertemente ácido) a 5.86 (moderadamente ácido) con un promedio de 5.29, estos resultados son similares a los encontrados por Domínguez Masís (2001); López Aguilar (2003); Pérez Castellanos (2016).

Análisis de Varianza del Diseño Anidado

El Cuadro 2 expone los resultados del análisis de varianza total de cada uno de los atributos analizados, divididos en 4 componentes o niveles jerárquicos que representa las distancias estratificadas de muestreo N1= 150 m (distancia que separa los nidos); N2= 50 m (distancia que separa dos transectos del mismo nido); N3= 20 m (distancia más larga de cada transecto); N4= 5 m (distancia más corta de cada transecto).

El análisis de varianza tiene como objetivo estimar los porcentajes de varianza aportados por cada nivel con respecto a la varianza total, de tal manera que, basado en los resultados de esta investigación se puedan establecer distancias de muestreo dependiendo de la variable que se desea analizar en un futuro, tal cual lo ilustra el Cuadro 2 y los semivariogramas de la Figura 1.

Cuadro 2

Análisis de Varianza del Diseño de los atributos morfológicos, físicos y químicos de los suelos del lote

Tobiatá, San Nicolás, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras.

Atributo¥	Varianza aportada por nivel (%)			
	N4	N3	N2	N1
P_P_H (cm)	27.21	34.31	18.22	20.26
P_E (cm)	15.51	29.61	51.59	3.29
R. P. 300 PSI (cm)	19.95	17.30	34.47	28.28
DAP (kg cm ⁻³)	24.17	23.41	36.47	15.95
% Arena	26.26	23.08	33.30	17.37
% Limo	25.62	18.69	40.95	14.74
% Arcilla	17.66	30.11	25.48	26.75
CO (%)	25.87	41.70	10.09	22.33
pH	33.45	22.91	22.33	21.32

Nota. ¥ morfológicas: profundidad del primer horizonte (P_P_H) y profundidad efectiva (P_E); físicas: resistencia a la penetración a 300psi

(R. P. 300psi), densidad aparente (DAP), arena (% arena), limo (% limo), arcilla (% arcilla); y de las variables químicas: carbono orgánico (CO)

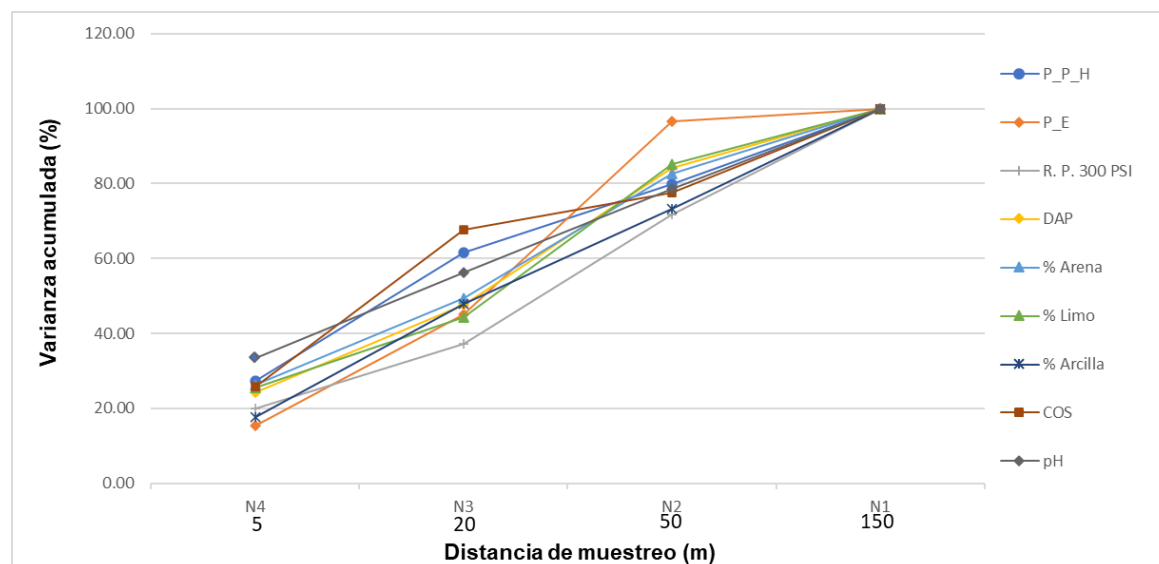
y pH.

El N1, correspondiente a 150 m, es el que concentra el menor porcentaje de la varianza para la mayoría de estas características; en este nivel no se encontraron variables que hagan un aporte significativo a la varianza total. El variograma que se presenta en la Figura 1 muestra como la varianza incrementa casi de manera lineal desde el N4 hasta el N2, punto en el que tiende ligeramente a estabilizarse.

Figura 3

Variograma de los atributos morfológicos, físicos y químicos de los suelos del lote Tobiatá, San

Nicolás, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras.



Nota. \forall Atributos morfológicos: profundidad del primer horizonte (P_P_H) y profundidad efectiva (P_E); físicos: resistencia a la penetración a 300psi (R. P. 300psi), densidad aparente (DAP), arena (% arena), limo (% limo), arcilla (% arcilla); y variables químicas: carbono orgánico del suelo (COS) y pH.

En el nivel 2 es donde la mayor parte de atributos estudiados (P_E; R. P. 300 psi; DAP; % Arena; % Arcilla) presentan una alta varianza (Cuadro 2 y Figura 1). Se puede observar que los mayores porcentajes de varianza acumulada se presentan en el N2, logrando una tendencia más estabilizadora con respecto a la varianza entre el N2 y el N1. Los resultados muestran que existe una tendencia a la estabilización de la varianza antes de los 150 metros en la mayoría de las variables evaluadas, con una varianza acumulada promedio a los 50 m de 81%, sugiriendo una alta variabilidad espacial a distancias cortas, lo que hace pensar que dicha variabilidad pudiera estar relacionado con el manejo del lote. Los resultados para las variables porcentaje de arena y limo son similares a los reportados por Ovalles y Rey B. J. (1995); Guimarães (2000); Shukla et al. (2004); Peña Venegas (2006); Rubiano (2005) y Peña R et al. (2009); sin embargo, la variable porcentaje de arcilla presenta los mayores porcentajes de varianza en el nivel 2 y nivel 3, contrario a los resultados encontrados por los autores antes mencionados para esta variable. Para la variable DAP los resultados son similares a los encontrados

por Guimarães (2000); Shukla et al. (2004) y Luengas (2005), quienes reportan un rango de 50 m y 131 m respectivamente, aunque difiere de lo encontrado por Giraldo y Mendoza (2003) y Peña Venegas (2006) quien establece una distancia máxima de 20 m para este atributo.

El atributo de COS presenta su mayor variabilidad en el nivel 3, concentrando el resto de variabilidad principalmente en los niveles N1 y N4; estos resultados difieren a lo encontrado por Rubiano (2005); Peña Venegas (2006) y (Peña R et al. 2009), quienes encontraron la mayor variabilidad en el nivel N1; sin embargo, los resultados son similares a los encontrados por Guimarães (2000) en Brasil, Melchiori et al. (2000) y Luengas (2005). Para pH, su mayor variabilidad está presente en el nivel N4, señalando alta variabilidad espacial a distancias cortas, lo que contradice lo encontrado por Rubiano (2005) quien encontró en la Altillanura de Colombia que los nidos pueden estar separados por distancias mayores a 4000 m, datos similares a los encontrados por otros autores (Ovalles y Rey B. J. 1995; Gho 2004; Luengas 2005). El atributo P_P_H presenta una dependencia espacial en los niveles N3 y N4, datos similares a los de Peña Venegas (2006) y Peña R et al. (2009).

Análisis de Semivariogramas

Para los atributos morfológicos se muestra a través del análisis de los semivariogramas que no existe un solo modelo específico que explique la variabilidad de este suelo. Para el atributo P_P_H el modelo gaussiano fue el que mejor se ajustó, mientras que para P_E fue el modelo esférico el mejor ajustado (Cuadro 3 y Figura 2). En los atributos físicos ocurre lo mismo que con las variables morfológicas, ya que no hay un único modelo específico de semivariogramas que expliquen la variabilidad espacial, presentándose tres modelos de semivariogramas (gaussiano, esférico y exponencial) que se ajustaron a las variables estudiadas (Cuadro 3 y Figura 2). En el caso de las propiedades químicas (Carbón orgánico CO y pH), fue el modelo esférico es el que mejor se ajustó (Cuadro 3 y Figura 2); lo cual, es consistente con lo reportado para estas variables en los estudios realizados por Oliveira et al. (1999); Verges (2004); Peña Venegas (2006) y Peña R et al. (2009), pero difiere un poco a lo encontrado por Rodríguez Garay et al. (2016).

Cuadro 3

Modelos teóricos ajustados a los semivariogramas experimentales para evaluar la variabilidad espacial de los atributos morfológicos, físicos y químicos de los suelos del lote Tobiata, San Nicolás, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras.

Atributo	Modelo	Pepita	Meseta	Rango (m)	r ²	(Pepita/Meseta) *100	r ² vc
P_P_H	Gaussiano	9.28	21.33	382.75	0.77	43.51	0.83
P_E	Esférico	95.41	133.79	382.75	0.11	71.31	0.03
R_P_300 PSI	Gaussiano	74.22	81.36	227.53	0.40	91.22	0.45
DAP	Esférico	0.01	0.01	382.75	0.72	100.00	0.80
% Arena	Exponencial	12.78	14.23	194.70	0.26	89.78	0.66
% Limo	Exponencial	2.91	11.21	306.17	0.39	25.99	0.50
% Arcilla	Gaussiano	1.40	2.82	97.72	0.38	49.54	0.19
CO	Esférico	0.01	0.02	108.92	0.32	25.00	0.24
pH	Esférico	0.03	0.09	255.64	0.48	37.36	0.95

Nota. Atributos morfológicos: profundidad del primer horizonte (P_P_H) y profundidad efectiva (P_E); físicos: resistencia a la penetración a 300psi (R. P. 300psi), densidad aparente (DAP), arena (% arena), limo (% limo), arcilla (% arcilla); y químicos: carbono orgánico (CO) y pH.

Las variables P_P_H y DAP fueron las que presentaron una estructura bien definida con un r^2 de ajuste al modelo teórico alto (0.77 y 0.72 respectivamente). Los atributos pH, R_P 300 psi, porcentaje de limo y arcilla, presentaron un r^2 moderado y bajo para el resto de los atributos según lo reportado por Obando et al (2006).

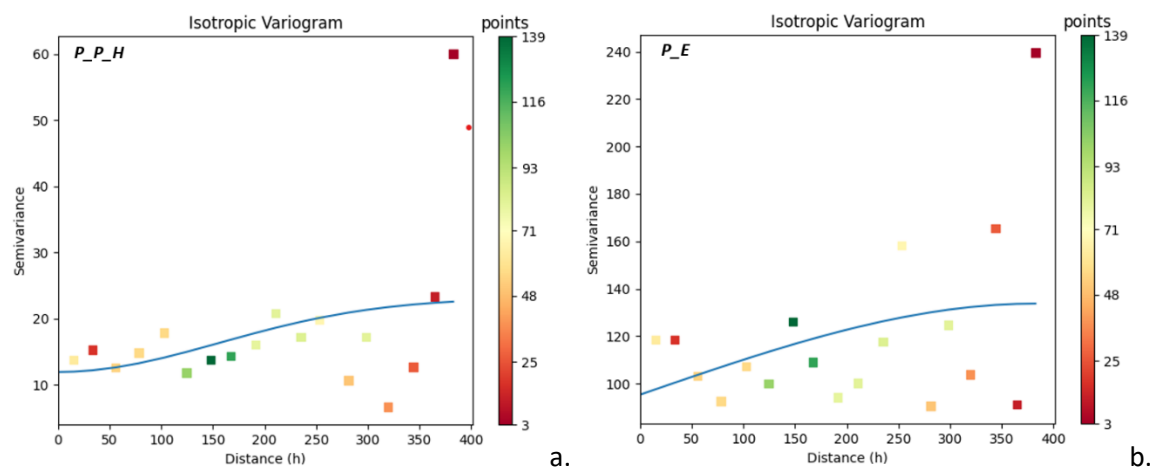
El cuadro 3 muestra que todas las variables estudiadas estuvieron autocorrelacionadas a distancias largas entre 195 m y 382 m con excepción de las variables porcentaje de arcilla (% Arcilla) y CO que obtuvieron un rango de 97 y 108 m respectivamente, esto puede estar explicado por la predominancia de la fracción arena dentro del área. Todos los valores se encuentran dentro de la distancia máxima considerada para el cálculo de los semivariogramas. Los resultados de P_P_H y CO es superior al rango encontrado por Peña Venegas (2006) y Rodríguez Garay et al. (2016) respectivamente, el resto de las variables presenta rangos menores a los encontrados por Peña Venegas (2006) y Peña R et al. (2009).

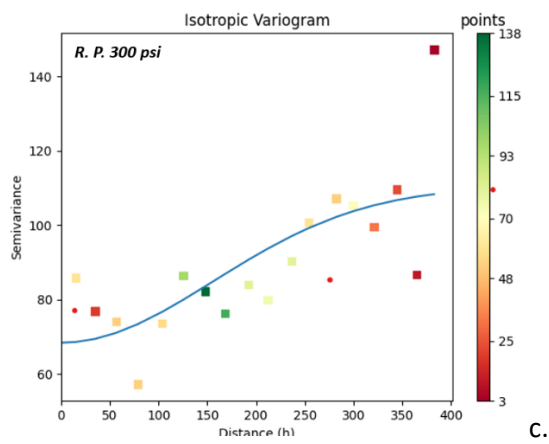
El efecto pepita puro no fue observado en ninguna de las variables analizadas, la mayoría de ellas presentaron una dependencia espacial moderada, a excepción de R_P_300psi, DAP y porcentaje

arena que presentaron una dependencia espacial débil, según la clasificación propuesta por Cambardella et al. (2004) quien estableció tres categorías para agrupar las variables según al porcentaje que representa la pepita en el valor de la meseta ($(\text{pepita}/\text{meseta}) \times 100$), estableciendo que una pepita menor o igual a 25% significa que posee una fuerte dependencia espacial, entre 25 y 75% moderada y mayor a 75% débil. La existencia de la dependencia espacial es muy importante para cada una de las variables analizadas, ya que afecta las predicciones que de ellas se pueda realizar como, la distancia a la cual establecer los puntos de muestreo para la generación de mapas de variabilidad espacial, afecta las predicciones de la interpretación de los mapas como, los niveles de fertilización del suelo, las enmiendas y las prácticas de labranza en el suelo, siendo afectados por una correlación positiva o negativa de las propiedades del suelo (Córdova et al. 2020).

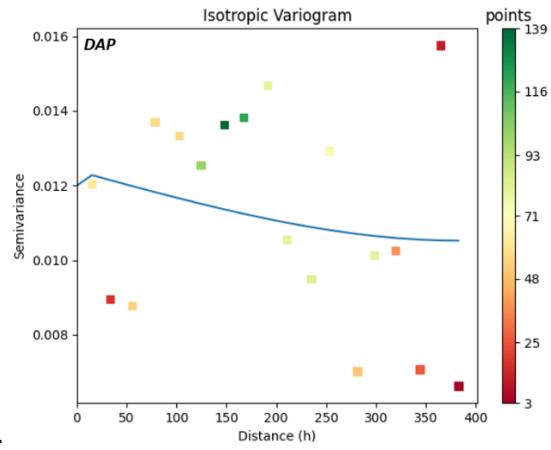
Figura 4

Semivariogramas de los atributos morfológicos, físicos y químicos de los suelos del lote Tobiatá, San Nicolás, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras.

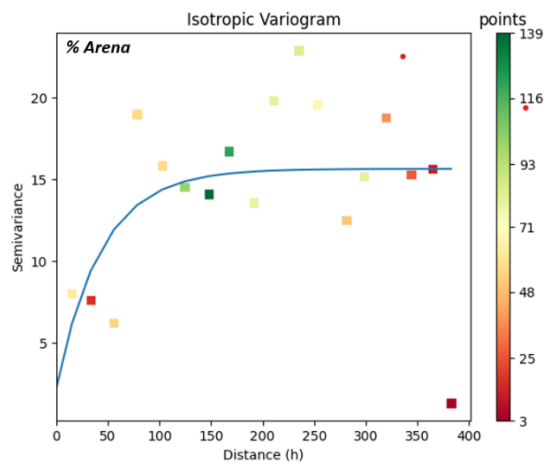




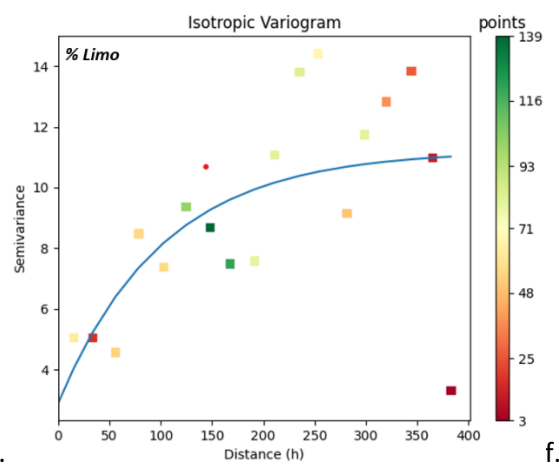
c.



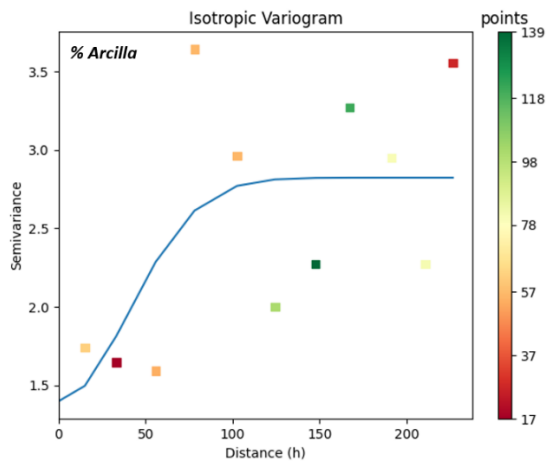
d.



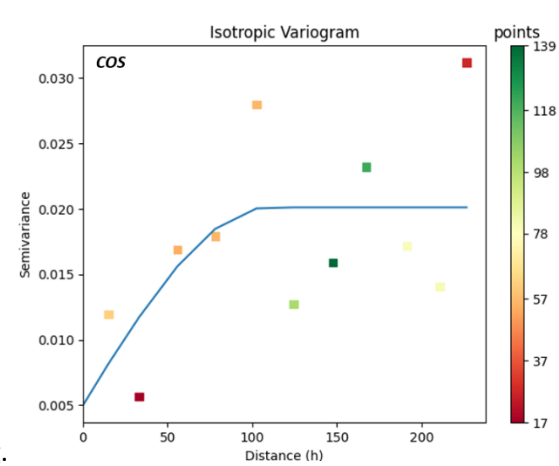
e.



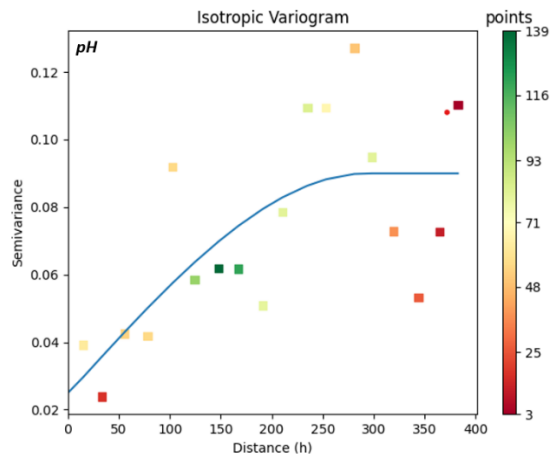
f.



g.



h.



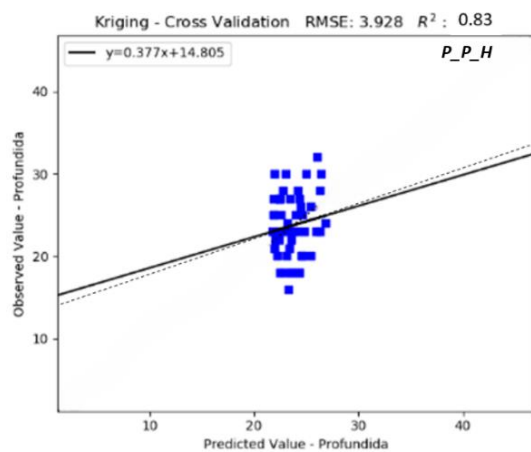
i.

Nota. ¥ atributos morfológicos: a. profundidad del primer horizonte (P_P_H) y b. profundidad efectiva (P_E); físicos: c. resistencia a la penetración a 300psi (R. P. 300psi), d. densidad aparente (DAP), e. arena (% arena), f. limo (% limo), g. arcilla (% arcilla); y químicos h. carbono orgánico (CO) y i. pH.

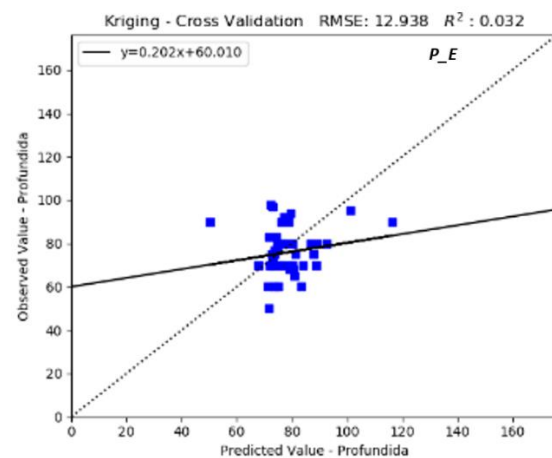
En la elaboración de los mapas se utilizó una escala de 1:3000, para realizarlos se procedió a realizar un análisis de validación cruzada, la cual permite determinar la precisión en la estimación de los valores no muestreados a través de la zona, debido a la relación entre los valores observados y sus respectivos valores estimados que calcula la validación cruzada (Figura 3).

Figura 5

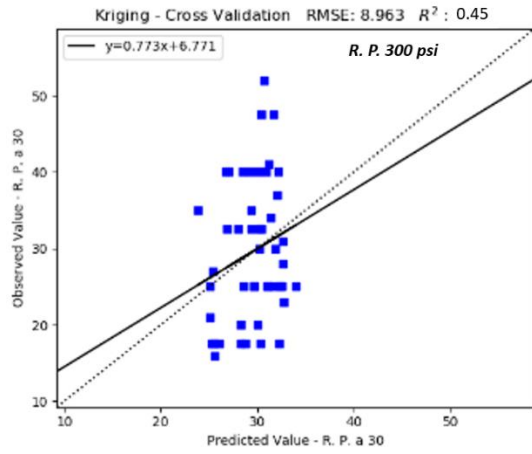
Validación Cruzada de los atributos morfológicos, físicos y químicos de los suelos del lote Tobiatá, San Nicolás, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras.



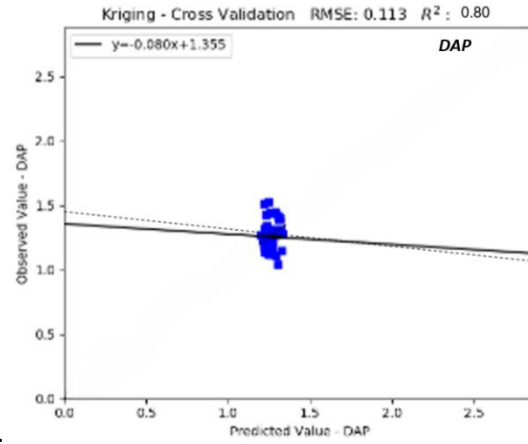
a.



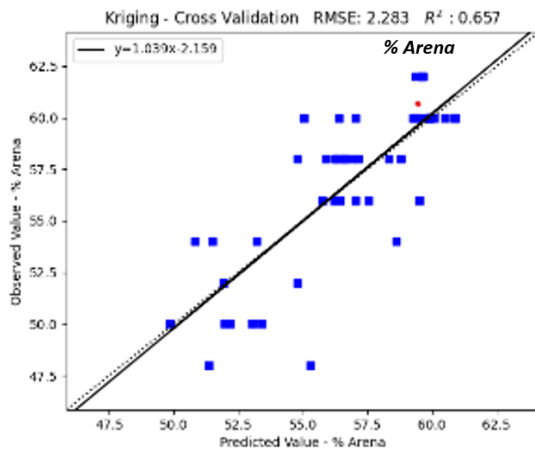
b.



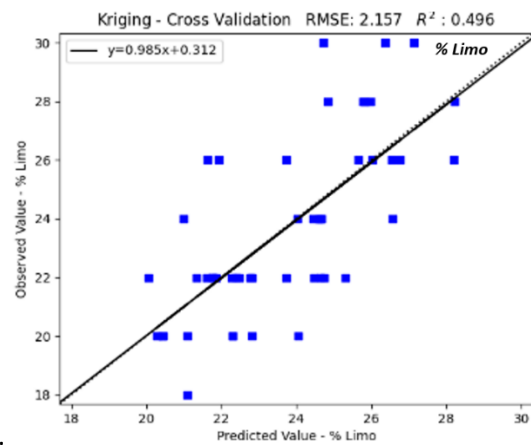
c.



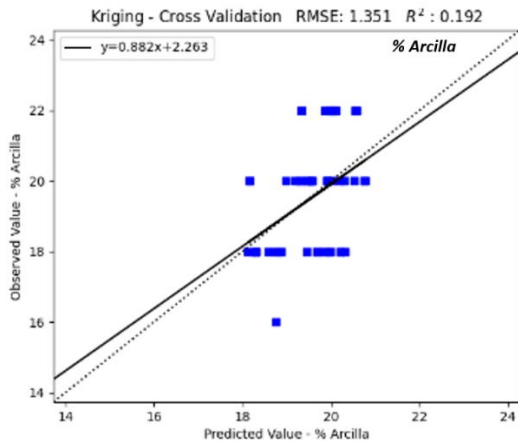
d.



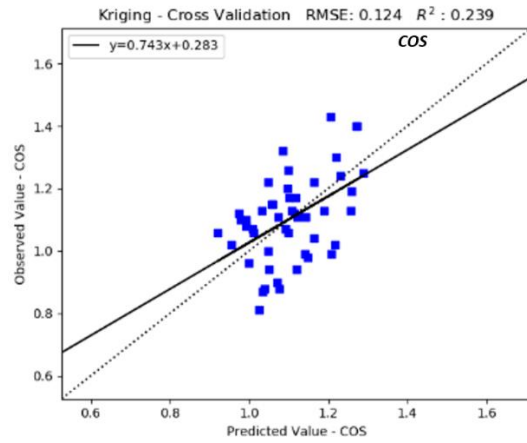
e.



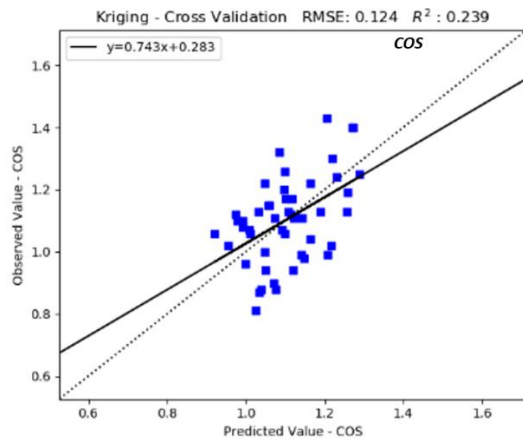
f.



g.



h.



i.

Nota: \forall atributos morfológicos: a. profundidad del primer horizonte (P_P_H) y b. profundidad efectiva (P_E); físicos: c. resistencia a la penetración a 300psi (R. P. 300psi), d. densidad aparente (DAP), e. arena (% arena), f. limo (% limo), g. arcilla (% arcilla); y químicos h. carbono orgánico (CO) y i. pH.

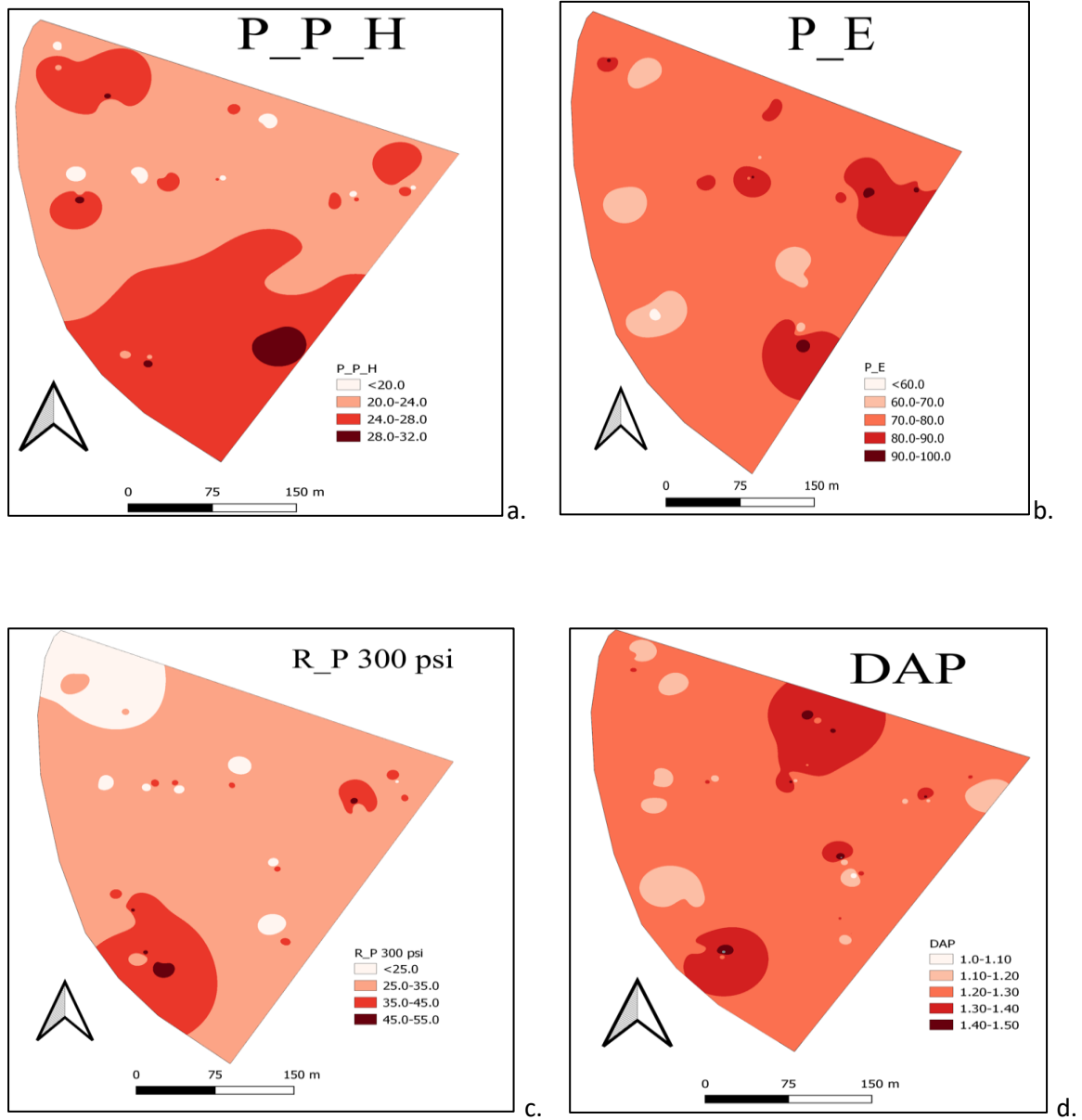
Los atributos que presentaron un mayor r^2 en la validación cruzada fueron P_P_H, DAP, porcentaje de arena (% Arena), porcentaje de limo (% Limo) y pH, obteniendo los valores de 0.83, 0.80, 0.66, 0.50 y 0.95 respectivamente. Presentando los valores más bajos de r^2 los atributos de P_E, R. P. 300 psi, porcentaje de arcilla (% Arcilla) y CO. Estos datos indican que los mapas que presentan mayor precisión en el comportamiento de las variables en el campo son los que poseen el mayor valor de r^2 . En la Figura 4 se presentan los mapas obtenidos para todas las variables estudiadas, debido a su interés en la discusión.

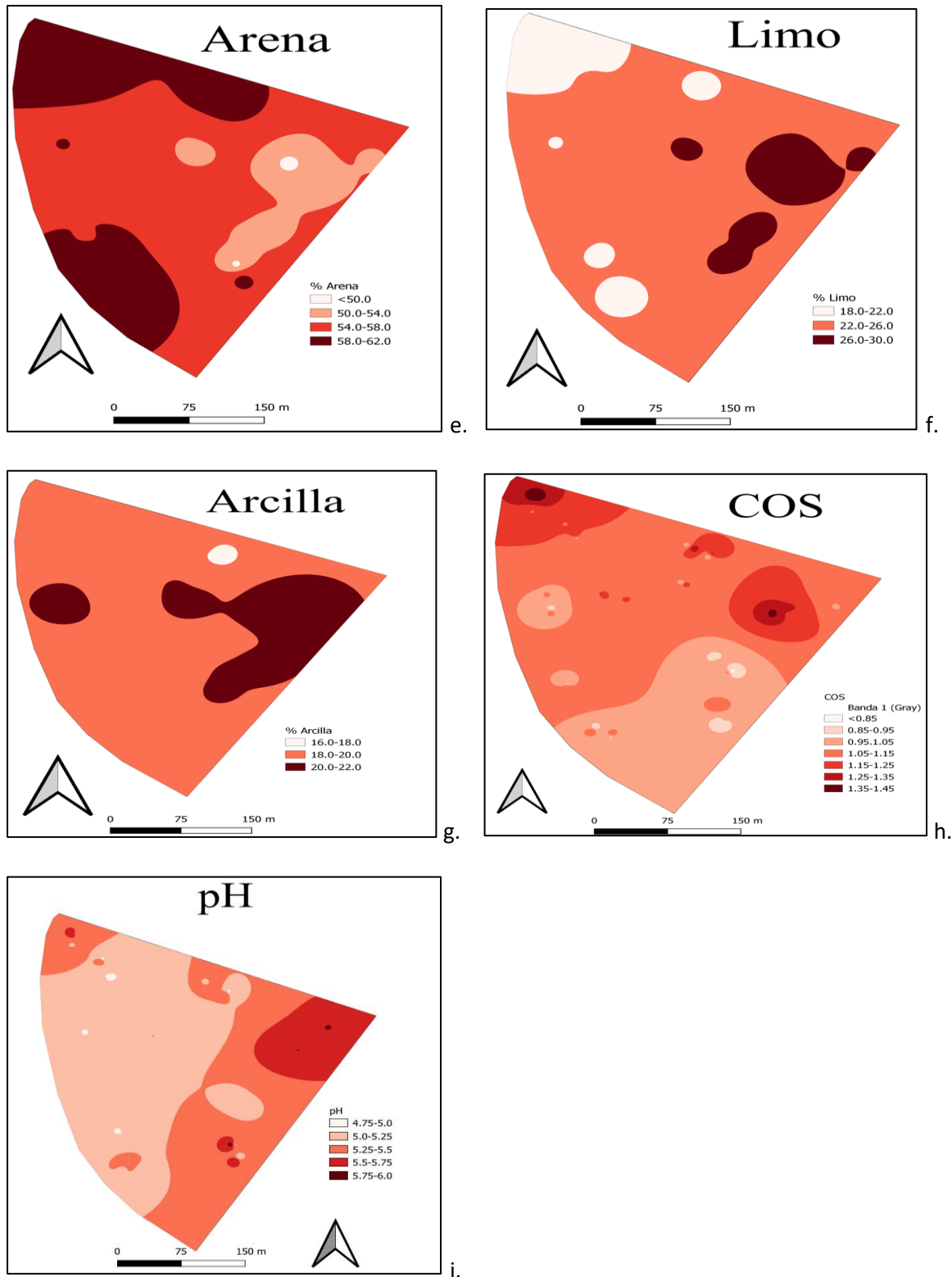
Los mapas de la Figura 4 muestran el comportamiento de cada una de las variables analizadas. Los mapas fueron realizados en una escala de color rojo, mostrando los datos más bajos para cada variable analizada en los colores más claros y los colores más oscuros para los datos más altos. Además, se puede comprobar que la variabilidad espacial no es muy alta, ya que se muestra la predominancia de valores altos o bajos en el mapa, esta predominancia concuerda con los resultados de la estadística descriptiva (Cuadro 1), mostrando que la media de los datos obtenidos está dentro del rango de mayor predominancia en el área.

Figura 6

Mapas de Variabilidad espacial de los atributos morfológicos, físicos y químicos de los suelos del lote

Tobiatá, San Nicolás, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras.





Nota. ¥ atributos morfológicos: a. profundidad del primer horizonte (P_P_H) y b. profundidad efectiva (P_E); físicos: c. resistencia a la penetración a 300psi (R. P. 300psi), d. densidad aparente (DAP), e. arena (% arena), f. limo (% limo), g. arcilla (% arcilla); y químicos h. carbono orgánico (CO) y i. pH.

Conclusiones

El mayor porcentaje de varianza acumulada se presentó en el nivel 2 (50 m) N2, por lo que las distancias de muestreo para las variables evaluadas no deben de ser superior a 50 metros, ya que posee una alta variabilidad a distancias cortas.

La alta variabilidad, a distancias cortas, de los suelos estudiados expone que su comportamiento está muy influenciado y ligado a los procesos evolutivos del suelo y al manejo agronómico durante su vida productiva.

La variable Densidad Aparente (DAP) no presentó dependencia espacial, clasificando su variabilidad como aleatoria o debida al azar, determinado que no es posible la realización de mapas de variabilidad espacial, ya que independientemente de la distancia a la que se realice el muestreo los resultados siempre van a ser diferentes.

Las variables de porcentaje de Limo (% Limo) y Carbono Orgánico (CO) fueron las que presentaron una fuerte dependencia espacial, lo que indica que la variabilidad de estas características está muy influenciada y ligada a las distancias que se establezcan para los puntos de muestreo.

Los mapas de variabilidad espacial de los atributos Profundidad del Primer Horizonte (P_P_H), Densidad Aparente (DAP), Porcentaje de Arena (% Arena), Porcentaje de Limo (% Limo) y pH son los que representan de mejor manera el comportamiento de las variables al presentar los mayores valores del r^2 de la validación cruzada, siendo ideales para ser interpretados y tomar decisiones con respecto al manejo del suelo y los cultivos.

Recomendaciones

Evaluar esta metodología con distancias más cortas de 50, 25, 10 y 4 m, para definir de forma más acertada las distancias a las cuales es óptimo realizar muestreos del suelo para realizar mapas de variabilidad espacial.

Evaluar otras variables químicas de suelos como, porcentaje de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), magnesio (Mg), sodio (Na), calcio (Ca), aluminio (Al), etc. Para determinar las distancias óptimas para realizar muestreos y mapas de variabilidad espacial para proponer un plan de fertilización para aplicaciones localizadas.

Evaluar esta metodología y comparar el comportamiento de la variabilidad espacial de los suelos en otros sistemas de producción como, frutales, forestales, pastizales, cultivos intensivos y bosques, con el fin de determinar el grado de influencia que posee el tipo de manejo que recibe el suelo con respecto a la variabilidad de las propiedades del suelo.

Referencias

- Acevedo DC, Hernández Acosta E, Maldonado Torres R, Álvarez Sánchez ME. 2015. Variabilidad espacial del carbono en un suelo después de 10 años de retiro e incorporación de residuos de cosecha. *Terra Latinoamericana Revista Terra Latinoamericana*. 33(1):199–208.
- Alemán Montes B, Búcaro Gonzales A, Henríquez Henríquez C, Largaespada Zelaya K. 2019. Mapeo digital de suelos agrícolas en la región occidental del Valle Central de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 33(2):157–166.
- Arciniegas Rojas EP, Gomez Sanchez NS. 2018. Intro 4 [Variabilidad espacial de algunas propiedades físicas y químicas de los suelos, con diferentes sistemas de manejo]. Villavicencio-Meta: Universidad de los Llanos. 45 p.
- Arévalo GE, Sánchez-Amaya JM, Guillen-Marquina I. 2023. Estudio del contenido materia orgánica por dos métodos analíticos en suelos de Honduras. *Revista de Ciencias Ambientales. Tropical Journal of Environmental Science*. 57(1):1–13.
- Barahona Flores R. 2002. Caracterización detallada de los suelos de San Nicolás y prácticas recomendadas para su uso sostenible, El Zamorano, Honduras [Tesis de Pregrado]. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. 63 p.
- Baridón E. 2019. Morfología del suelo. [sin lugar]: Departamento de Ambiente y Recursos Naturales Facultad de Ciencias Agraria y Forestales U.N.L.P. 9 p.
- Cambardella CA, Moorman TB, Andrews SS, Karlen DL. 2004. Watershed-scale assessment of soil quality in the loess hills of southwest Iowa. *Soil & Tillage Res*. 78(1):237–247.
- Ciarlo EA, Del Muschietti MP, Peralta HR, Comparín M, Gregorini F, Cipriotti PA, Giuffrè L. 2020. Variabilidad espacial de propiedades del suelo: efecto del uso y tipo. *Ciencia del Suelo*. 38(2):249–261.
- Córdova C, Magna C, Barrera JA, Zagal E. 2020. Dependencia espacial del potencial de nitrógeno disponible del suelo en dos sitios contrastantes. *Chilean J. Agric. Anim. Sci., ex Agro-Ciencia*. 36(1):14–25.
- Domínguez Masís RG. 2001. Caracterización Sistemática de los suelos de San Nicolás, El Zamorano, Honduras [Tesis de Pregrado]. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. 76 p.
- Escobar Perea Y, Vargas Batis B, Ramos García YM, Rodríguez Suárez EJ, Rodríguez Osoria O, Rodríguez Fonseca R. 2021. Propiedades físicas del suelo en cuatro fincas suburbanas de Santiago de Cuba. *Centro Agrícola*. 48(2).
- [FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. 2009. Guía para la descripción de suelos. Roma: [sin editorial].
- [FAO] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. 2021. ¿Qué es el pH del suelo? [sin lugar]: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. <https://www.fao.org/3/ca7162es/ca7162es.pdf>.
- Fernández Díaz JV. 2003. Caracterización detallada de los suelos de los sectores de Zorrales y Monte Redondo, de El Zamorano, Honduras para el establecimiento y renovación de pastura [Tesis de Pregrado]. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. 58 p.

- Fernández Martínez F, Camacho Tamayo JH, Rubiano Sanabria Y. 2022. Estimating texture and organic carbon of an Oxisol by near infrared spectroscopy. *Revista Ciencia Agronómica*. 53(1):67–81.
- Forsythe W., Sancho F, Villatoro M. 2005. Efecto de la compactación de los suelos sobre el rendimiento de maíz en tres localidades de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 29(3):175–185.
- Gauggel Rivas C, Arévalo Valderrama G, Barahona R, editores. 2009. Índices de calidad del suelo para las propiedades morfológicas, físicas y químicas. XVIII congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo y VI Congreso Nacional de Suelos. [sin lugar]: [sin editorial].
- Gho BC. 2004. Variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo y su relación con los rendimientos de maíz (*Zea mays* L.) [Tesis de Posgrado]. Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, de Chile, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Departamento de Ciencias Vegetales.
- Giraldo S, Mendoza A. 2003. Caracterización de la variabilidad espacial de las propiedades físicas de los lotes experimentales destinados al cultivo de Hortalizas en CEUNP [Tesis de Pregrado]. Palmira: Universidad Nacional de Colombia.
- Guachún Calderón DR. 2022. Evaluación de la variabilidad espacial de propiedades del suelo bajo diferentes usos/coberturas en la Granja El Romeral de la Universidad de Cuenca [Tesis de Pregrado]. Quito, Ecuador: Universidad de Cuenca. 68 p.
- Guerra-Hernández EA, Cruz-Flores G, Etchevers-Barra JD. 2021. Soil organic carbon and particulate carbon in water in riparian systems under different land use. *Terra Latinoamericana*. 39(1):1–13. doi:10.28940/terra.v39i0.1249.
- Guimaraes EC. 2000. Variabilidade espacial de atributos de um latossolo vermelho escuro textura argilosa da regio do cerrado, submetido ao plantio direto e ao plantio convencional [Tesis Posgrado]. Universidade Estadual de Campinas: Campinas.
- Henríquez C, Ortiz O, Largaespada K, Portugués P, Vargas M, Villalobos P, Gomez D. 2011. Determinación de la resistencia a la penetración, al corte tangencial, densidad aparente, temperatura en un suelo cafetalero, Juan Viñas, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 35(1):175–184.
- Hernández Conejo E. 2020. Actualización de la evaluación de la aptitud de los suelos de uso agrícola de Zamorano y su mapeo con sistemas de información geográfica [Tesis de Pregrado]. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. 99 p.
- Jaramillo DF. 2011. Origen, propiedades, espacialidad. 2ª ed. [sin lugar]: Editorial Un.
- Jaramillo J. DF. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de ciencias, Medellín. 619 p.
- Jaramillo J. DF. 2012. Variabilidad espacial del suelo: bases para su estudio. *Revista de la Facultad de Ciencias Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín*. 1(1):73–87.
- Jaramillo Jaramillo DF. 2015. Variabilidad espacial de algunas propiedades químicas de suelos palmeros de Colombia. *Suelos Ecuatoriales*. 45(2):55–64.
- Jiao J. 2010. Study on spatial variation of soil erosion in Northeastern China. *China. Research of Soil and Water Conservation*. 17(63):1–6.
- Lefèvre C, Wiese L, Rekik F, Alcantara V. 2017. Carbono orgánico del suelo el potencial oculto. Roma: [sin editorial].

- Li SL, Zhang YB, Rui YK, Chen XF. 2012. Nutrient content in maize kernels grown on different types of soil. *International Journal of Experimental Botany*. 81(1):41–43.
- López Aguilar J. 2003. Caracterización de suelos de la Zamoempresa de Cultivos Extensivos en el Valle de El Zamorano, Honduras [Tesis de Pregrado]. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. 29 p.
- Lozano JF. 2004. Validación de índices para conductividad hidráulica y compactación en algunos suelos del valle del cauca [Tesis Posgrado]. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, sede Palmira.
- Luengas CA. 2005. Estudio se la variabilidad espacial en un suelo con diferentes ciclos de intervención agrícola en la altillanura colombiana [Tesis de Posgrado]. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Programa de Maestría en Ciencias Agrarias.
- Madero EE, editor. 2002. The Cartography of soil compaction. XI Congreso Colombiano de la Ciencia del Suelo. Cali: [sin editorial].
- Mantovani EC, Carvalho Pinto FA de, Queiroz DM de, editores. 2006. Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable: Introducción ala agricultura de precisión. Uruguay: PROCISUR. 246 p. ISBN: 92-9039-741-1.
- Martínez LJ, Zinck JA. 1994. Modelling spatial variations of soil compaction in the Guaviare colonization area, Colombian Amazonia. *ITC-Journal*. 3(1):252–263.
- Melchiori RJ, García FO, Echeverría H, editores. 2000. Variabilidad espacial en algunas propiedades del suelo. I Asociación con las Variaciones en Rendimiento del Cultivo. Paraná: [sin editorial].
- Oliveira JJ, Chaves LHG, Queiroz JE, Luna JG de. 1999. Variabilidade espacial de propriedades químicas em um solo salino-sódico. *Revista Basileira de Ciencia do Solo*. 23(1):783–789.
- [ONU] Organización de las Naciones Unidas. 2022. La población mundial llegará a 8000 millones en 2022. [sin lugar]: Departamento de Asuntos Económicos y Sociales. <https://www.un.org/es/desa-es/la-poblaci%C3%B3n-mundial-llegar%C3%A1-8000-millones-en-2022>.
- Ovalles FA. 1991. Evaluación de la variabilidad espacial de los suelos a nivel de parcela para el establecimiento de lotes experimentales en el estado de Cojedes. *Agronomía Tropical*. 41(1-2):5–21.
- Ovalles FA, Rey B. J. 1995. Variabilidad interna de unidades de fertilidad en suelos de la depresión del lago de valencia. *Agronomía Tropical*. 44(1):41–65.
- Peña R, Rubiano Y, Peña A, Chaves B. 2009. Variabilidad espacial de los atributos de la capa arable de un inceptisol de piedemonte de la cordillera Oriental (Casanare, Colombia). *Agronomía Colombiana*. 27(1):111–120.
- Peña Venegas RA. 2006. Caracterización de la variabilidad espacial de los atributos del suelo como base para el manejo por sitio específico en el cultivo de piña Gold estudio de caso Tauramena-Llanos Orientales [Tesis de Posgrado]. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, Facultada de Agronomía. 127 p.
- Peña-Venegas RA, Rubiano-Sanabria Y, Peña-Quiñones AJ. 2013. Definición de Unidades de Gestión Agrícola en un Inceptisol del departamento de Casanare Colombia. *Orinoquia*. 17(2):230. doi:10.22579/20112629.21.

- Peralta NR, Barbieri P, Gowland T, Aparicio V, Costa JL. 2015. Agricultura de precisión: dosis variables de nitrógeno en cebada. *Ciencia del Suelo*. 33(1):131–137.
- Pérez Castellanos RJ. 2016. Determinación de la necesidad de cal en los suelos agrícolas de Zamorano, Honduras [Tesis de Pregrado]. Honduras: Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano. 34 p.
- Peukert S, Griffith BA, Murray PJ, Macleod CJA, Brazier RE. 2016. Spatial variation in soil properties and diffuse losses between and within grassland fields with similar short-term management. *Eur J Soil Sci*. 67(4):386–396. eng. doi:10.1111/ejss.12351.
- Rodríguez Garay FA, Camacho Tamayo JH, Rubiano-Sanabria Y. 2016. Variabilidad espacial de los atributos químicos del suelo en el rendimiento y calidad de café. *CTA*. 17(2):237–254. doi:10.21930/rcta.vol17_num2_art:493.
- Rubiano Y. 2005. Sistema georreferenciado de indicadores de calidad del suelo. Herramienta SIG para apoyo a la planificación, uso y manejo del suelo [Tesis de Posgrado]. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Palmira.
- SAS Institute Inc. 2021. SAS Enterprise Guide 8.1: Guía del usuario. Cary, NC: [sin editorial]. 436 p.
- Shukla MK, Staler BK, Lal R, Cepuder P. 2004. Spatial variability of soil properties and potential management classification of a chernozemic field in lower Austria. *Soil Science*. 169(12):852–860.
- Stancovicová K, NOVÁK J, BAJLA J, CHLPÍK J. 2008. Penetration resistance of soil on the yearlong using mountain pasture by the cattle. *Journal Central European Agriculture*. 9(2):311–316.
- Vargas Curaca E, Céspedes Paredes R. 2019. Clasificación de los suelos según la aptitud de riego en la Estación Experimental de Patacamaya. *Revista de Investigación e Innovación Agropecuaria y Recursos Naturales, La Paz*. 6(2):72–80.
- Vargas Rojas R. 2004. Metodologías para el levantamiento del recurso suelo. 2ª ed. Cochabamba: [sin editorial]. 145 p.
- Verges G. 2004. Uso de modelos espaciales para el análisis estadístico de experimentos agronómicos de gran tamaño [Tesis de Posgrado]. Santiago (Chile): Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Vieira SR, Falci Dechen SC. 2010. Spatial Variability studies in Sao Paulo, Brasil Along the last twenty five years. *Brangatia, Campinas*. 69(1):53–66.
- Viera M. 2002. Introducción a la geoestadística. [sin lugar]: [sin editorial].
- Villarroel P. 2018. Estudio del control de compactación de tranques de relaves mineros utilizando modelos geoestadísticos [Tesis de Pregrado]. Chile: Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.
- Webster R. 1985. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Advances in soil science*, Springer-Verlag. 3(1):1–70.
- Webster R, Welham SJ, Potts JM, Oliver MA. 2006. Estimating the spatial scales of regionalized variables by nested sampling, hierarchical analysis of variance and residual maximum likelihood. *Comput. Geosci*. 39(9):1320–1333.
- Zhang XQ, Li WH, Jin YM. 2010. Essential mineral contents and their seasonal dynamic changes of Hempleaf Nettle (*Urtica cannabina* L.) in Ortindag sandy land. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*. 24(1):129–133.

- Zhao JY, Zheng Y, Xu L. M., Lv Q. L. 1998. Studies on nutrient supplying properties of different soil types for Tobacco. *Journal of Henan agricultural University*. 32(1):55–58.
- Zhong ZX, Xu YM, Wan K. Y., Chen XF. 2007. Trace elements in leaves of 21 rare species of Magnoliaceae and Lauraceae in the ex-situ conservation site of Wuhan Botanical Garden and trace elements in soil. *Journal of Northeast Forestry University*. 35(1):46–48.

Anexos

Anexos A

Perfiles modales



Anexos B

Descripción de perfiles modales

Perfil No.: 1

Fecha de descripción: 22/05/2003

Descrita por: Gabriel Morales

Ubicación: Lote Tobiatá 13.9947205, -87.0053130

Precipitación media anual: 1100 mm

Distribución de lluvias: Bimodal

Temperatura media anual: 26°C

Tipo de clima ambiental: Cálido Seco

Tipo de Paisaje: Valle

Elevación: 800 msnm

Pendiente: 3%, Ligeramente inclinada

Drenaje Interno: Rápido

Drenaje Externo: Rápido

Nivel freático: No visible

Uso de la tierra: Agricultura

Vegetación: Maíz

Cultivo: Maíz 20 DDS aproximadamente

Rendimiento: -

Tipo de Riego: Pivote


Erosión: Moderado

Otros: -

Horizonte	Profundidad	Descripción
A ₁	0-17 cm	10 YR 3/2 pardo grisáceo muy oscuro, franco arenoso; bloques angulares finos moderados y bloques subangulares medianos moderados, friable en húmedo, ligeramente pegajoso y ligeramente plástico en mojado, sin pedregosidad, muchas raíces y de todos los grosores, sin actividad de macroorganismos. No hay resistencia a la penetración.
A ₂	17-35 cm	10 YR 3/3 pardo oscuro, franco arenoso; bloques angulares medianos fuertes, friable en húmedo, ligeramente pegajoso y ligeramente plástico en mojado, sin pedregosidad, muchas raíces y de todos los tamaños, sin actividad de macroorganismos. No hay resistencia a la penetración.
AB	35-49 cm	10 YR 4/2 pardo oscuro a pardo, franco; bloques angulares medianos y grandes fuertes, firme en húmedo, ligeramente pegajoso y ligeramente plástico en mojado, sin pedregosidad, pocas raíces y muy finas, sin actividad de macroorganismos. R. P. 14.5 Kg/cm ²
C	49-65 cm	7.5 YR 4/3 pardo grisáceo muy oscuro, franco arenoso; bloques angulares Medianos y grandes fuertes, moderadamente duro en seco, muy firme en húmedo, ligeramente pegajoso y ligeramente plástico en mojado, frecuente pedregosidad de tipo gravilla, sin presencia de raíces, sin actividad de macroorganismos. R. P. 14.5 Kg/cm ²
BC	65-82 cm	2.5 YR 4/6 rojo y 5 YR 4/1 gris oscuro, arcilloso; sin estructura, friable en húmedo, moderadamente pegajoso y moderadamente plástico en mojado, sin pedregosidad, sin presencia de raíces, sin actividad de macroorganismos. R. P. 3.5 Kg/cm ²

Anexos C

Resultados de Laboratorio

	ESCUELA AGRÍCOLA PANAMERICANA LABORATORIO DE SUELOS ZAMORANO				
	LSZ-MC-F31 INFORME DE RESULTADOS		ANÁLISIS DE SUELOS		
		Versión	2		
Sistema de Gestión de Calidad ISO/IEC 17025					
Solicitante	Fecha Ingreso Muestra	Fecha Envío Informe	Procedencia de la muestra		Página
Tesis Gabriel Evelardo	2023-02-10	2023-03-17	Lote Tobiatá, EAP		1 de 3
Dirección del cliente	N° Lote de Análisis	Cultivo	Informe N°		Anexo Recomendación
EAP Zamorano	2023-04	---	2023-044		Sí: <input type="checkbox"/> No: <input checked="" type="checkbox"/> x

Código Interno Lab.	Identificación de la muestra	Textura	Granulometría (%)			pH* (H ₂ O)	%		
			Arena	Limo	Arcilla		C.O.	M.O.	N _{total}
23-S-0586	Punto #1	Franco Arenoso	60	22	18	5.36	1.40	2.41	0.12
23-S-0587	Punto #2	Franco Arenoso	60	20	20	5.69	1.40	2.41	0.12
23-S-0588	Punto #3	Franco Arenoso	60	20	20	5.13	1.24	2.14	0.11
23-S-0589	Punto #4	Franco Arenoso	60	20	20	5.51	1.13	1.96	0.10
23-S-0590	Punto #5	Franco Arenoso	62	18	20	4.92	1.22	2.11	0.11
23-S-0591	Punto #6	Franco Arenoso	60	20	20	5.48	1.13	1.96	0.10
23-S-0592	Punto #7	Franco Arenoso	58	24	18	5.05	1.20	2.08	0.10
23-S-0593	Punto #8	Franco Arenoso	58	22	20	4.92	1.04	1.79	0.09
23-S-0594	Punto #9	Franco Arenoso	60	20	20	4.97	1.06	1.82	0.09
23-S-0595	Punto #10	Franco Arenoso	54	26	20	5.03	1.00	1.72	0.09
23-S-0596	Punto #11	Franco Arcillo Arenoso	56	22	22	5.17	0.90	1.55	0.08
23-S-0597	Punto #12	Franco Arenoso	58	22	20	5.20	1.08	1.86	0.09
23-S-0598	Punto #13	Franco Arenoso	56	26	18	5.12	1.13	1.95	0.10
23-S-0599	Punto #14	Franco Arenoso	56	24	20	5.16	1.17	2.02	0.10
23-S-0600	Punto #15	Franco Arenoso	56	24	20	5.26	1.17	2.01	0.10
23-S-0601	Punto #16	Franco Arenoso	58	24	18	5.08	1.11	1.92	0.10
23-S-0602	Punto #17	Franco Arenoso	56	26	18	5.15	0.94	1.62	0.08
23-S-0603	Punto #18	Franco Arenoso	60	22	18	5.19	1.13	1.95	0.10
23-S-0604	Punto #19	Franco Arenoso	60	22	18	5.13	1.15	1.99	0.10
23-S-0605	Punto #20	Franco Arenoso	60	20	20	4.92	1.11	1.92	0.10
23-S-0606	Punto #21	Franco Arenoso	62	20	18	5.17	1.10	1.89	0.09
23-S-0607	Punto #22	Franco Arenoso	60	22	18	5.18	0.94	1.63	0.08

Rango Medio	1.20	2.00	0.10
	2.30	4.00	0.20

	Alto
	Medio
	Bajo



ESCUELA AGRÍCOLA PANAMERICANA
LABORATORIO DE SUELOS ZAMORANO

LSZ-MC-F31 INFORME DE RESULTADOS

ANÁLISIS DE SUELOS

Versión

2

Sistema de Gestión de Calidad ISO/IEC 17025

Solicitante	Fecha Ingreso Muestra	Fecha Envío Informe	Procedencia de la muestra	Página		
Tesis Gabriel Evelardo	2023-02-10	2023-03-17	Lote Tobiatá, EAP	2 de 3		
Dirección del cliente	Nº Lote de Análisis	Cultivo	Informe Nº	Anexo Recomendación		
EAP Zamorano	2023-04	---	2023-044	Sí:	No:	x

■	Alto
■	Medio
■	Bajo

Código Interno Lab.	Identificación de la muestra	Textura	Granulometría (%)			pH* (H ₂ O)	%		
			Arena	Limo	Arcilla		C.O.	M.O.	N _{total}
23-S-0608	Punto #23	Franco Arenoso	60	22	18	5.16	1.12	1.92	0.10
23-S-0609	Punto #24	Franco Arenoso	60	22	18	5.49	0.88	1.53	0.08
23-S-0610	Punto #25	Franco Arenoso	60	22	18	5.73	0.87	1.50	0.07
23-S-0611	Punto #26	Franco Arenoso	58	24	18	5.04	0.96	1.66	0.08
23-S-0612	Punto #27	Franco Arenoso	54	26	20	5.23	1.10	1.89	0.09
23-S-0613	Punto #28	Franco Arcillo Arenoso	52	26	22	5.24	1.06	1.82	0.09
23-S-0614	Punto #29	Franco	50	28	22	5.11	0.81	1.40	0.07
23-S-0615	Punto #30	Franco Arenoso	56	26	18	5.17	1.02	1.76	0.09
23-S-0616	Punto #31	Franco Arenoso	58	24	18	5.23	0.88	1.52	0.08
23-S-0617	Punto #32	Franco	48	30	22	5.86	1.07	1.85	0.09
23-S-0618	Punto #33	Franco	50	28	22	5.03	1.06	1.82	0.09
23-S-0619	Punto #34	Franco	50	28	22	5.22	1.07	1.85	0.09
23-S-0620	Punto #35	Franco Arenoso	58	24	18	5.00	1.22	2.11	0.11
23-S-0621	Punto #36	Franco Arenoso	58	22	20	5.17	0.98	1.69	0.08
23-S-0622	Punto #37	Franco Arenoso	62	22	16	5.41	0.99	1.70	0.09
23-S-0623	Punto #38	Franco Arenoso	60	22	18	4.96	1.26	2.18	0.11
23-S-0624	Punto #39	Franco Arenoso	60	20	20	5.22	1.02	1.76	0.09
23-S-0625	Punto #40	Franco Arenoso	60	22	18	5.45	1.32	2.28	0.11
23-S-0626	Punto #41	Franco Arenoso	58	22	20	5.80	1.11	1.92	0.10
23-S-0627	Punto #42	Franco Arenoso	58	22	20	5.66	1.12	1.93	0.10
23-S-0628	Punto #43	Franco Arenoso	54	26	20	5.50	0.99	1.70	0.09
23-S-0629	Punto #44	Franco	52	28	20	5.60	1.15	1.98	0.10

Rango Medio	1.20	2.00	0.10
	2.30	4.00	0.20



ESCUELA AGRÍCOLA PANAMERICANA LABORATORIO DE SUELOS ZAMORANO			
LSZ-MC-F31 INFORME DE RESULTADOS	ANÁLISIS DE SUELOS	Versión	2

Sistema de Gestión de Calidad ISO/IEC 17025

Solicitante	Fecha Ingreso Muestra	Fecha Envío Informe	Procedencia de la muestra	Página		
Tesis Gabriel Evelardo	2023-02-10	2023-03-17	Lote Tobiatá, EAP	3 de 3		
Dirección del cliente	Nº Lote de Análisis	Cultivo	Informe Nº	Anexo Recomendación		
EAP Zamorano	2023-04	---	2023-044	Sí:	No:	x



Código Interno Lab.	Identificación de la muestra	Textura	Granulometría (%)			pH* (H ₂ O)	%		
			Arena	Limo	Arcilla		C.O.	M.O.	N _{total}
23-S-0630	Punto #45	Franco	50	30	20	5.61	1.30	2.25	0.11
23-S-0631	Punto #46	Franco	50	28	22	5.75	1.43	2.47	0.12
23-S-0632	Punto #47	Franco	48	30	22	5.70	1.25	2.15	0.11
23-S-0633	Punto #48	Franco Arenoso	54	26	20	5.76	1.19	2.06	0.10


Rango Medio	1.20	2.00	0.10
	2.30	4.00	0.20


Métodos: % Carbono Orgánico : Metodo de Walkley & Black para suelos minerales no salinos. % N total: 5% de M.O. pH: 1:1 en agua: AOAC 994.16 rango de 4,00-10,00. Textura: Metodo de Bouyoucos.


*Ensayo Acreditado: Consultar alcance de acreditación en <https://sde.gob.hn/oha/>



El laboratorio no se hace responsable por el estado de la muestra al ingresar a nuestras instalaciones. Los resultados se relacionan solo con las muestras recibidas. El laboratorio se exonera de responsabilidad por reproducción parcial o total del informe, o el uso que pueda darsele. El lote de análisis remite la fecha de ejecución de análisis

Vn. Bn.: 
 Dr. Ricardo Peña Venegas
 Director Unidad de Suelos


 Ing. Eunice Aguilera Núñez
 Responsable del análisis



E-mail: laboratoriosuelos@zamorano.edu, rpena@zamorano.edu., Tel: (504) 2287-2000 ext. 2316 Fax: (504) 2287-6242 Cel: 9969-6846
 Laboratorio de Suelos, Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria Apartado Postal # 93 Tegucigalpa-Honduras. Km 30 Carret. Danlí