

# 11

---

Fecha de presentación: enero, 2021

Fecha de aceptación: marzo, 2021

Fecha de publicación: abril, 2021

## **CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES HIDROFÍSICAS DEL SUELO CON CULTIVO DE CACAO, SU INCIDENCIA EN SU CAPACIDAD PRODUCTIVA**

### **A CHARACTERIZATION OF THE SPATIAL BEHAVIOR OF THE HYDROPHYSICAL PROPERTIES OF THE SOIL WITH CACAO CULTIVATION, ITS IMPACT ON YIELD**

Kleber Alexander Cruz Lovato<sup>1</sup>

E-mail: [kacruz\\_est@utmachala.edu.ec](mailto:kacruz_est@utmachala.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2714-881X>

Julio Chabla Carrillo<sup>1</sup>

E-mail: [jecabla@utmachala.edu.ec](mailto:jecabla@utmachala.edu.ec)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9761-5890>

<sup>1</sup> Universidad Técnica de Machala. Ecuador.

#### Cita sugerida (APA, séptima edición)

Cruz Lovato, K. A., Chabla Carrillo, J. E. (2020). Caracterización del comportamiento espacial de las propiedades hidrofísicas del suelo con cultivo de cacao, su incidencia en su capacidad productiva. *Revista Científica Agroecosistemas*, 9(1), 85-95.

#### RESUMEN

El aumento de la producción agropecuaria para cubrir las necesidades alimenticias del mundo, requiere de un manejo eficaz de los recursos suelo y agua. Ante esta situación se planteó identificar el comportamiento espacial de las propiedades hidrofísicas y por medio de técnicas Geoestadísticas delimitar zonas homogéneas que permitan incorporar un manejo predial zonificado optimizando los recursos de agua, suelo, económicos y sociales. La presente investigación se realizó en un predio cacaotero. Se georreferenció 20 puntos de muestreo determinados por el método de grilla donde se tomaron muestras a dos profundidades, siendo de 0-10cm HA y de 10-20cm HB. Se realizaron análisis de laboratorio y pruebas físicas de infiltración para determinar doce variables de estudio como Arena, Limo, Arcilla, CC, PmP, PT, Da, Dr, MO, IEE, Ib, Ks. Los resultados evidenciaron mayor variabilidad en el comportamiento espacial en los primeros 10 cm del suelo, generando la formación de cuatro zonas homogéneas en HA y dos en el HB por medio del análisis clúster con una distancia euclidiana de 50 y 60 respectivamente, en ambos perfiles de estudio las propiedades presentaron dependencia espacial débil respecto a los modelos de ajuste teóricos Esférico y gaussiano. Por medio de la caracterización de las propiedades se identificó un suelo de clase textural franco, estructuralmente estable con contenidos de materia orgánica alta, sin embargo, la calidad del suelo no incide en la producción del predio, puesto que en zonas de alta calidad los rendimientos por planta son muy bajos, principalmente por un mal manejo agronómico.

#### Palabras clave:

Técnicas Geoestadísticas, materia orgánica, comportamiento espacial, zonas homogéneas.

#### ABSTRACT

The increase in agricultural production to meet the world's food needs requires efficient management of soil and water resources. In view of this situation, it was proposed to identify the spatial behavior of hydrophysical properties and by means of geostatistical techniques to delimit homogeneous zones that allow incorporating a zoned farm management, optimizing water, soil, economic and social resources. This research was carried out in a cocoa farm. Twenty sampling points were georeferenced using the grid method where samples were taken at two depths, 0-10cm HA and 10-20cm HB. Laboratory analysis and physical infiltration tests were performed to determine twelve study variables such as Sand, Silt, Clay, CC, PmP, PT, Da, Dr, MO, IEE, Ib, Ks. The results showed greater variability in the spatial behavior in the first 10 cm of the soil, generating the formation of four homogeneous zones in HA and two in HB by means of cluster analysis with a Euclidean distance of 50 and 60 respectively, in both study profiles the properties presented weak spatial dependence with respect to the Spherical and Gaussian theoretical adjustment models. Through the characterization of the properties, a loam textural class soil was identified, structurally stable with high organic matter content; however, soil quality does not affect the production of the farm, given that in high quality areas yields per plant are very low, mainly due to poor agronomic management.

#### Keywords:

Geostatistical techniques, organic matter, spatial behaviour, homogeneous zones.

## INTRODUCCIÓN

El cultivo de Cacao (*Theobroma cacao* L.) en el Ecuador representa el segundo porcentaje de mayor área sembrada en América solo por debajo de Brasil, con un 24% y 40% respectivamente (Sánchez, et al., 2019), efectuando así, un liderazgo en producción representado en las 237,598 Tn y 220,568.5 Tn por cada país, generadas en el periodo 2017 – 2018 (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2020b), ejerciendo un papel importante y vital en la economía de pequeños y medianos productores (Asociación Nacional de Exportadores de Cacao e Industrializados del Ecuador, 2019).

Existe una relación entre la producción y el comportamiento espacial de las propiedades hidrofísicas del suelo, siendo un punto de inicio para mejorar los sistemas de manejo prediales precisos, sostenibles y sustentables en el tiempo (Valbuena, et al., 2008). Sin embargo, la mayoría de agricultores desconocen el estado actual de sus suelos.

El estudio de las propiedades hidrofísicas del suelo nos permite determinar su capacidad actual de uso, su incidencia en el sistema de producción y las alternativas de integrar prácticas agronómicas de mantenimiento o recuperación del recurso suelo (Varón Ramírez, 2016).

Un suelo en estado de degradación, es incapaz de proporcionar condiciones para una producción sustentable (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2020a). Mediante un estudio de las variables regionalizadas por medio de herramientas Geoestadísticas se puede contrarrestar las principales causas de este problema que son la compactación y la erosión.

La heterogeneidad espacial de las propiedades del suelo causa una variación de la producción dentro del predio (Godwin & Miller, 2003). Lo cual direcciona a la implementación de una agricultura de precisión que radica en la identificación y cuantificación de la variación en el espacio de factores que afecten el rendimiento, permitiendo delimitar zonas homogéneas, con el objetivo de fraccionar el predio en regiones con un manejo diferenciado (Kitchen, et al., 2005), beneficiando el uso del recurso suelo que se verá reflejado en la capacidad productiva.

Por consiguiente, la presente investigación se basó en la identificación del comportamiento espacial de las propiedades hidrofísicas de un suelo cacaotero, para así, contribuir a la actividad agropecuaria con propuestas de mejoras en sus sistemas productivos, basados en la implementación de herramientas tecnológicas y direccionados a la optimización de recursos y mejores rendimientos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación se realizó en el área de cacao de la Facultad de Ciencias Agropecuarias

perteneciente a la Universidad Técnica de Machala ubicada en el Km 5.5 de la vía Machala-Pasaje, parroquia El Cambio, provincia de El Oro (Figura1). De acuerdo a las zonas de vida natural de Holdrige (1947) y el mapa ecológico del Ecuador, el sitio de ensayo corresponde a un bosque muy seco Tropical (bms-T). Presenta una temperatura media anual de 25 °C, heliofania promedio anual de 2 a 3 horas por día y precipitación media anual de 427 mm.

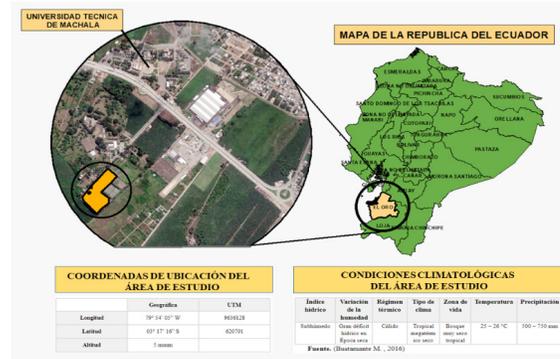


Figura 1. Ubicación y Localización del área de estudio.

Se realizó un método de muestreo en grilla, se determinó 20 puntos georreferenciados con GPS a 40m de distancia abarcando toda el área de estudio (figura 2).

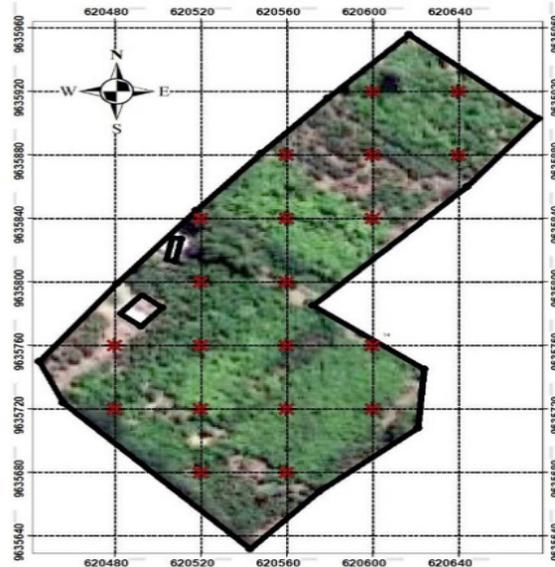


Figura 2. Distribución de puntos de muestreo.

En cada punto Georreferenciado se realizó una calicata en forma de escalera con dos gradas de 10 cm de profundidad, obteniendo un total de 40 muestras. las pruebas de campo de infiltración se realizaron con los anillos de Muntz en cada punto por un tiempo de 150 minutos. Así mismo, se identificaron 5 plantas por punto georreferenciados, para la determinación del rendimiento productivo del predio. En Tabla 1, se describe los métodos de laboratorio y de campo utilizados para su determinación, en la investigación.

Tabla 1. Análisis de laboratorio y pruebas físicas en cada punto de muestreo.

Variabes	Método	Parámetro
Coficientes Hídricos	Relación de pesos	C.C (%) PMP (%)
Textura	Hidrómetro bouyoucos	Arena (%) Limo (%) Arcilla (%)
Densidad Aparente	Cilindro metálico	Da (.)
Densidad Real	Picnómetro	Dr (.)
Infiltración	Anillos de Muntz	Tiempo básico Infiltración básica Sortividad Conductividad Hidráulica
Espacio poroso	Relación de densidades	Porosidad Total (%)
Carbono Orgánico	Ignición	CO (%)
Producción	Número de mazorcas	Rendimiento

Las curvas de infiltración acumulada se ajustaron a las ecuaciones de los modelos teóricos que se describen a continuación:

Modelo de Kostiakov:

Donde:

i: Infiltración acumulada (.)

t: Tiempo transcurrido

a: Coeficiente que representa la velocidad de infiltración cuanto el tiempo es igual a 1

b: Parámetro adimensional

Modelo de Philip:

Donde:

I: Infiltración acumulada (.)

t: Tiempo transcurrido

S: Sortividad (.)

: Conductividad hidráulica (.)

La infiltración básica se determina en función de un tiempo básico, tales ecuaciones se describen de la siguiente forma:

Infiltración básica:

Tiempo básico:  $t_b = -600(b-1)$

## Análisis de datos

Se efectuó la estadística descriptiva con los datos de las diversas variables, como media, mediana, mínimo, máximo, asimetría y curtosis. El coeficiente de variación de Pearson se calculó y clasificó según su porcentaje en cada propiedad.

Para conocer la existencia o no de diferencias estadísticas significativas entre las dos profundidades del suelo en estudio, se aplicó una prueba t de Student para grupos independientes, previo cumplimiento a los supuestos de normalidad de datos (Test de Shapiro-Wilk), independencia de observaciones y homogeneidad de varianzas (Test de Levene).

La presencia o no de correlación significativa entre las variables se determinó mediante el coeficiente de correlación de Pearson y el empleo del software Rstudio 3.6.3. Posteriormente, se realizaron los semi-variogramas en el programa Surfer16, determinando los parámetros Geoestadísticos como Sill, Meseta y Rango, se utilizaron dos modelos teóricos de ajuste como el Esférico y gaussiano de los cuales se seleccionó el de mejor ajuste por medio de los coeficientes de determinación, Nash y error cuadrático medio. La variabilidad espacial se demostró por medio de interpolaciones Kriging ordinario en el programa Arcgis 10.3 con los parámetros Geoestadísticos previamente calculados.

Las zonas Homogéneas se identificaron por medio de análisis clúster realizado en el software Rstudio 3.6.3, determinando el número óptimo de grupos por medio del método de la silueta y corroborando por la ubicación del clúster en tal distancia euclidiana. La delimitación de las zonas se realizó en el programa Arcgis 10.3 por medio de interpolaciones simples de los puntos de muestreo con la asignación del clúster perteneciente.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caracterización de las propiedades hidrofísicas,

Como resultado del cálculo de las medidas de resumen de datos (Tabla2 y Tabla3) se observó que el coeficiente de variación en general indica poca variabilidad de las propiedades en el suelo, encontrando el mayor valor en la variable Arena (%) en ambos perfiles, con un resultado superior a 40% y el menor en la variable Da (.) en el perfil A y B con valores de 5.78% y 8.61% respectivamente

Tabla 2. Estadísticos descriptivos para propiedades discretas en HA.

	Ar (%)	L (%)	A (%)	Da	Dr	PT (%)	CC (%)	PmP (%)	MO (%)	IEE (%)
Media	34,27	42,98	22,75	1,61	2,44	34,3	25,4	14,31	15,51	23,69
Mediana	32,82	38,82	24,53	1,61	2,4	34,21	25,83	14,58	16,18	22,27
Desv.	9,67	12,27	9,51	0,093	0,218	8,82	4,38	2,76	3,18	4,31
Tip.	0,90	1	-0,47	0,967	0,106	-0,153	-0,49	-0,491	-0,43	0,92
Asimetría	0,49	0,534	0,71	0,908	-0,881	-0,132	-0,541	-0,542	0,04	0,79
Curtosis	22	29,3	0,35	1,5	2,07	16,26	16,36	8,63	8,1	18,38
Mínimo	57,65	74,35	38,78	1,84	2,84	51,11	32,58	18,82	21,16	35,06
Máximo	28,22	28,55	41,80	5,78	8,93	25,71	17,24	19,29	20,50	18,19
CV (%)										

Tabla 3. Estadísticos descriptivos para propiedades discretas en HB.

	Ar (%)	L (%)	A (%)	Da	Dr	PT (%)	CC (%)	PmP (%)	MO (%)	IEE (%)
Media	34,66	42,37	22,96	1,65	2,47	32,47	25,4	14,31	14,15	21,77
Mediana	32,82	35,82	24,35	1,67	2,47	34,85	26,36	14,92	14,91	21,25
Desv. Tip.	8,86	13,17	11,13	0,14	0,22	9,84	4,74	2,97	2,17	2,74
Asimetría	1,24	0,571	-0,61	-0,40	-0,4	-0,62	-0,35	-0,35	-0,39	0,576
Curtosis	2,34	-0,104	-0,57	-1,28	-0,72	-0,50	-1,07	-1,07	-1,01	-0,232
Mínimo	22	18,25	2,35	1,41	2,05	10,77	16,92	8,99	10,37	17,15
Máximo	60,35	70,35	38,7	1,83	2,86	44,65	32,58	18,82	17,48	27,46
CV (%)	25,56	31,08	48,48	8,61	9,03	30,30	18,66	20,75	15,34	12,59

La densidad aparente promedio osciló entre 1,61 y 1,65 para el horizonte A y B respectivamente, resultados similares a los obtenidos por Romero (2017). Al ser un suelo franco en algunos puntos de muestreo expreso valores de Da elevados, según Villaseñor (2016), esto se debe a la alta variabilidad del tamaño de partículas, puesto que las partículas finas llenan los espacios entre partículas gruesas generando agrupamientos densos. La densidad real en los Horizontes A y B expresó valores promedio de 2,44 y 2,47 respectivamente, de acuerdo a Heredia (2013), valores muy menores a 2.65 son suelos con porcentajes altos de materia orgánica, situación que se evidencia en el área de estudio puesto que en ambos horizontes se obtuvo valores mayores a 10% haciendo referencia a una clasificación alta de M.O.

El índice de estabilidad estructural (IEE) en los horizontes A y B presento valores de 23,69% y 21,77% respectivamente, definiendo el área de estudio como un suelo estructuralmente estable con porcentajes de porosidad total altos de acuerdo a la clasificación de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2009).

Las variables fueron agrupadas en función de su coeficiente de variación según la clasificación utilizada por Vásquez Polo (2009) (Tabla 4).

Tabla 4. Clasificación de las variables discretas según su CV.

CV (%)	Clasificación	Variable HA	Variable HB
< 20	Relativamente Homogéneas	Da - Dr - CC - PmP - IEE	Da - Dr - CC - IEE - MO
20 - 40	Moderadamente Homogéneas	Ar - L - PT - MO	Ar - L - PT - PmP
40 - 60	Normalmente Heterogéneas	A	A
> 60	Extremadamente Heterogéneas		

Como resultado de la prueba t de Student (Tabla 5) para la igualdad de medias en los dos Horizontes de estudio se obtuvo un p-valor mayor a 0.05 en cada variable, concluyendo, que no existe diferencias significativas entre las medias obtenidas en HA y en HB, por lo tanto, no existe evidencia estadística suficiente para aceptar una diferencia entre las medias de las variables analizadas en las profundidades estudiadas.

Tabla 5. Comparación de medias para cada variable en los dos Horizontes.

	Prueba de Levene		Prueba T para la igualdad de medias						
	F	p-valor	t	gl	p-valor	Diferencia de medias	Error típ. de la diferencia	L. Inferior	L. Superior
Ar	0,150	0,701	-0,130	38	0,897	-0,382	2,932	-6,318	5,553
A	0,352	0,557	-0,066	38	0,947	-0,217	3,274	-6,846	6,411
L	0,151	0,700	0,149	38	0,882	0,600	4,026	-7,551	8,751
CC	0,267	0,608	0,006	38	0,996	0,008	1,444	-2,917	2,933
PmP	0,267	0,608	0,004	38	0,997	0,004	0,907	-1,833	1,841
Da	7,238	0,011	-1,080	38	0,287	-0,041	0,037	-0,117	0,035
Dr	0,009	0,925	-0,480	38	0,634	-0,033	0,069	-0,174	0,107
PT	0,858	0,360	0,618	38	0,540	1,826	2,954	-4,155	7,807
MO	3,024	0,090	1,583	38	0,122	1,363	0,860	-0,379	3,105
IEE	4,895	0,033	1,677	38	0,102	1,916	1,142	-0,396	4,229

En la variable Infiltración de agua se utilizó dos modelos, presentando el modelo de Kostiakov un mejor coeficiente de determinación (R2) que el modelo de Philip, por lo tanto, dicho modelo expresa mejor el comportamiento de la infiltración en el área de estudio (Tabla6).

Tabla 6. Estadísticos descriptivos de los parámetros de los modelos de ajuste utilizados en la variable infiltración.

	Kostiakov					Philip		
	lb (mm/h)	Tb (min)	a	b	R2	Ks (cm/h)	S (cm/h2)	R2
Media	13,63	268,5	5,032	0,553	0,991	1,078	7,170	0,822
Mediana	13,67	265,6	4,840	0,560	0,990	1,030	6,710	0,800
Desv. típ.	0,533	5,851	0,304	0,010	0,005	0,213	0,730	0,045
Asimetría	-0,305	1,289	0,955	-1,336	0,083	1,774	1,100	1,480
Curtosis	-0,325	,236	-,910	0,229	0,766	3,256	-0,513	2,066
Mínimo	12,60	262,62	4,79	0,53	0,98	0,79	6,64	0,76
Máximo	14,53	281,22	5,58	0,56	1,00	1,63	8,61	0,95
CV (%)	3,909	2,179	6,059	1,968	0,558	19,819	10,187	5,492

La Infiltración básica presentó poca variabilidad en el área de estudio debido a su coeficiente de variación bajo (0,309 %), obteniendo un valor promedio de 13,63 mm/h.

El tiempo básico promedio superó el tiempo utilizado en la realización de la prueba en campo, situación similar a la encontrada por Orjuela-Matta, et al., (2010), el cual concluye que las pruebas físicas no llegaron a la saturación de suelo en el tiempo establecido.

La conductividad hidráulica se define como Moderadamente Lenta según la clasificación propuesta por el Servicio de conservación del suelo de EE. UU, donde ubica esta clase en rangos de 0.5 a 2 cm/h obteniendo en el área de estudio un promedio de 1.078 cm/h.

**Análisis de correlación,** La correlación existente entre las variables de estudio, se expresó con una correlación directa para la escala de colores azules y una correlación inversa para la escala de colores rojizos (Figura 3 y Figura4).

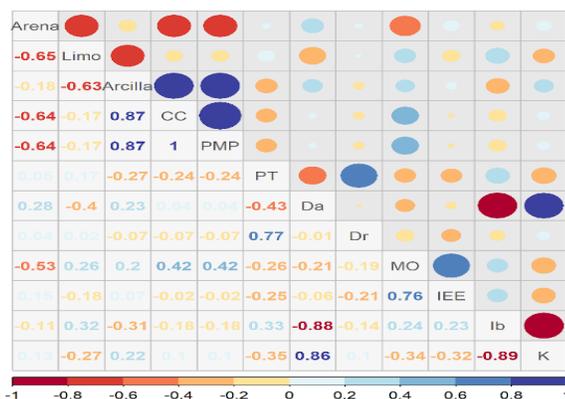


Figura 3. Matriz de correlación de Pearson para el Horizonte A.

La Da expreso correlación inversa con la PT y MO, propiedades que inciden en la lb, situación que se esperaba, puesto que en suelos con formación de empaquetamientos densos la infiltración de agua y la capacidad de retenerla disminuye. La MO es parte fundamental de un suelo bien estructurado y la capacidad del mismo para retener agua, situación que se comprueba por la correlación directa de la MO con el IEE y las propiedades hídricas como CC y PmP, las cuales también son directamente proporcionales con la arcilla por ser generadora de microporos y favorecer la retención de humedad.

En el Horizonte B, profundidad de 10-20 cm, la Arena presentó correlación inversa con la MO, en contraste con la arcilla que al actuar como un coloide favorece el contenido de materia orgánica.

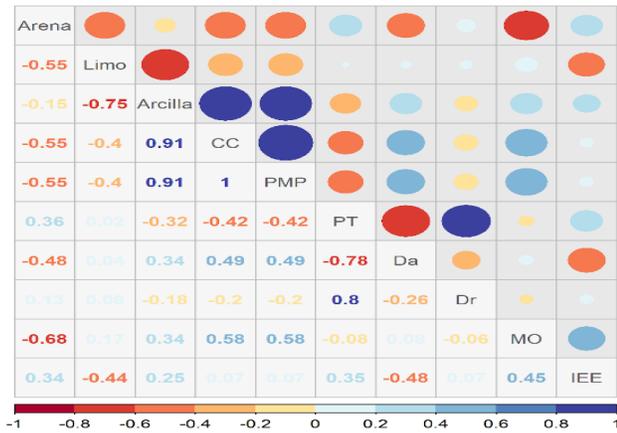


Figura 4. Matriz de correlación de Pearson para el Horizonte B.

**Variabilidad espacial,** El comportamiento espacial de las propiedades hidrofísicas presentó mejor predicción con los modelos teóricos, esférico y gaussiano, los cuales expresaron un valor de coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) y Nash más cercano a uno y un valor del error cuadrático medio más bajo (Tabla 7).

Tabla 7. Geoestadísticos para las propiedades en los dos perfiles de estudio.

Horizonte	Variable	Modelo	Nugget	Sill	Rango	R <sup>2</sup>	Nash	RMSE	De
HA	Ar	Esférico	1,27E-08	682,8	1312,00	1,000	1,000	0,19	2E-09
	L	Esférico	0,038	459,4	40,00	1,000	1,000	0,36	0,01
	A	Esférico	200,0	1000	400,00	0,925	0,849	6,64	20,00
	CC	Esférico	20,00	8,00E+01	130,00	0,948	0,973	1,88	25,00
	PmP	Esférico	45,40	232,0	333,00	0,880	0,995	1,58	19,57
	Da	Gaussiano	3,88E+02	470,0	68,88	0,924	1,000	0,05	82,57
	Dr	Esférico	1,27E-08	33,68	62,02	1,000	1,000	0,01	0,00
	MO	Gaussiano	9,16E-06	646,2	30,00	1,000	1,000	0,05	0,00
	PT	Esférico	15,00	50,00	100,00	0,963	0,883	3,39	30,00
	IEE	Esférico	10,46	190,6	65,22	0,999	0,999	0,34	5,49
	lb	Gaussiano	7,22E-07	770,7	47,80	1,000	1,000	0,01	0,00
	Ks	Gaussiano	12,28	100,0	40,00	1,000	1,000	0,03	12,28
	Rendimiento	Esférico	0,000	428,0	39,60	1,000	1,000	0,19	0,00
HB	Ar	Esférico	0,000	421,0	926,70	1,000	1,000	0,17	0,00
	L	Esférico	13,77	380,0	39,60	1,000	0,997	0,89	3,62
	A	Esférico	108,4	3849	1904,00	0,950	0,880	6,63	2,82
	CC	Esférico	0,000	438,0	142,00	1,000	1,000	0,13	0,00
	PmP	Gaussiano	10,00	273,2	133,90	0,905	0,998	1,12	3,66
	Da	Gaussiano	50,00	700,0	24,28	1,000	1,000	0,01	7,14
	Dr	Gaussiano	0,000	238,0	92,00	1,000	1,000	0,01	0,00
	MO	Esférico	216,0	1200	200,00	0,929	0,999	0,86	18,00
	PT	Gaussiano	30,00	50,00	55,41	0,985	0,859	4,2	60,00
	IEE	Gaussiano	10,00	597,8	84,79	0,997	1,000	0,24	1,67

La mayoría de las variables de estudio presentaron dependencia espacial débil al expresar valores por debajo del 25%, a excepción de la PT del HA y HB que se califica como moderada con valores entre 25% a 75%, y la Da en el HA con una clase fuerte por su valor mayor a 75%.

En las variables de estudio Arena, Limo, Da, IEE y Ks se observó un comportamiento espacial mayormente heterogéneo, en comparación con las demás variables de las cuales resalta la MO, con una distribución espacial más homogénea en los primeros 10cm de profundidad del suelo en toda el área experimental (Figura 5).

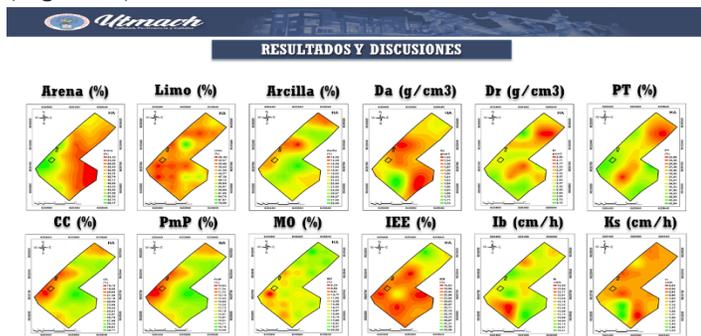


Figura 5. Distribución espacial de las propiedades de estudio en el HA.

Lo cual permite identificar las zonas de mayor y menor influencia, condición importante al momento de planificar prácticas culturales como el riego, fertilización y diseño del drenaje.

En el HB, profundidad de 10cm a 20cm se observó una distribución espacial más heterogénea (Figura 6) en las variables Arena, Limo e IEE, en contraste con el HA la MO, se expresó de manera más heterogénea lo que representa que a mayor profundidad, el contenido de materia orgánica disminuye por zonas, de igual forma la densidad aparente presentó un comportamiento espacial más homogéneo, haciendo referencia que a mayor profundidad del suelo las propiedades se distribuyen con menor variabilidad en el espacio.



Figura 6. Distribución espacial de las propiedades de estudio en el HB.

La productividad fue analizada, en base al número de mazorcas de cinco árboles por sitio de muestreo, se observó los mejores promedios en el punto 4 y 8 con valores de 20 y 25 mazorcas respectivamente (Tabla 8), los cuales se presentan con una calificación excelente, en contraste, los demás puntos presentaron una calificación en general mala (Figura 7).

Tabla 8. Rendimiento por sitio de muestreo.

Mazorcas /Punto Muestreo					
Punto	1	2	3	4	5
Media	1	4	0	20	8
Punto	6	7	8	9	10
Media	3	3	25	4	0
Punto	11	12	13	14	15
Media	0	2	2	2	0
Punto	16	17	18	19	20
Media	3	1	3	0	1

En las áreas con mejores rendimientos se encontró el cultivar ICS-95 con una baja densidad poblacional, a diferencia de los demás sitios, con cultivares como CCN-51, Criollo, Forastero y Trinitario los cuales se encuentran establecidos con mayores densidades poblacionales y abundancia de follaje.

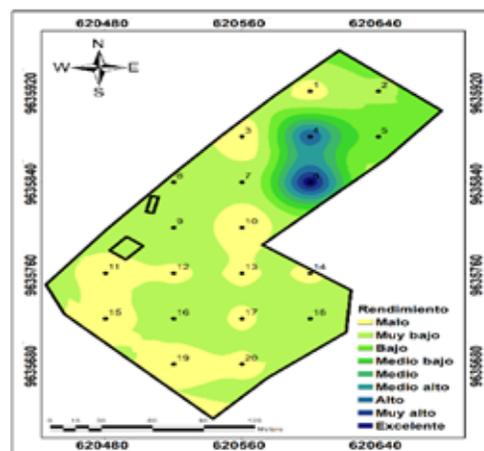


Figura 7. Distribución espacial del rendimiento del Predio

En los puntos P1 y P3, de la figura 7, donde el rendimiento alcanza valores de 1 y 0 mazorcas respectivamente, se observó los valores más altos de M.O, CC, PmP y PT, por lo que no se le atribuye la incidencia del comportamiento espacial de las propiedades hidrofísicas en la capacidad actual de producción del predio.

La baja producción de cacao en el área de estudio se presume que es efecto de un mal manejo agronómico, pues en el predio no existe un sistema de riego establecido y por ende el suministro de agua es escaso, además de la presencia de enfermedades como la monilia, bloqueo de entrada de luz solar y aire en el centro de la planta por abundancia de follaje, ese decir, escasez de podas de sanidad y formación.

**Delimitación de zonas homogéneas,** Como resultado del método de la silueta se obtuvo cuatro clústeres representativos para el horizonte A (Figura 8).

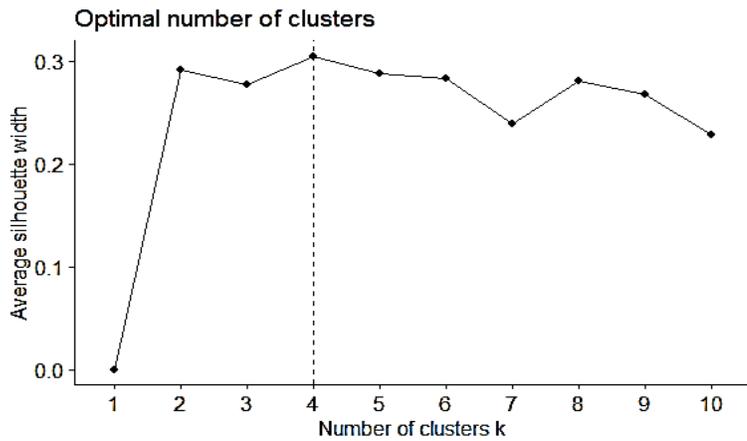


Figura 8. Número óptimo de clúster para HA.

Las cuatro zonas homogéneas para el Horizonte A, alcanzaron distancias euclidianas de 50 (Figura 9).

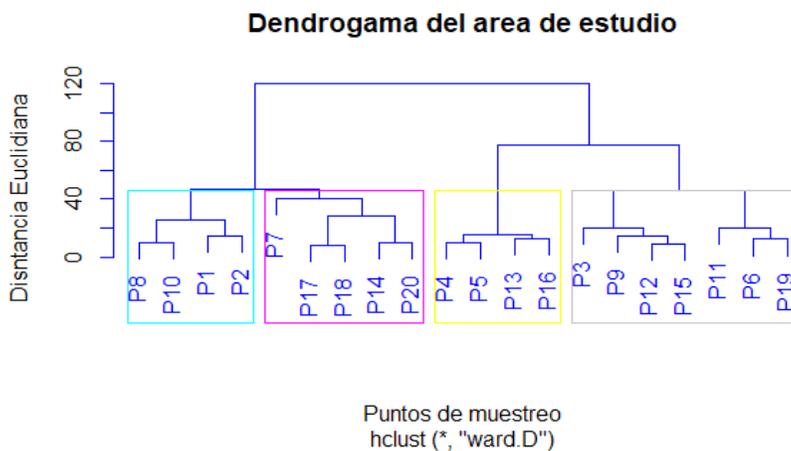


Figura 9. Dendrograma para HA.

El primer grupo se conformó por dos variables de estudio como MO e IEE (Tabla 9), propiedades que representan el mejor estado de fertilidad del suelo en el predio, por tanto, se tendría en cuenta en los diseños de fertilización con el fin de optimizar y fraccionar la aplicación de insumos agrícolas.

Tabla 9. Características de las Zonas Homogéneas para HA.

	Zona 1		Zona 2		Zona 3		Zona 4	
	$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV	$\bar{x}$	CV
Arena	33,1	18,0	43,2	21,7	32,0	11,4	24,4	9,21
Limo	48,0	9,00	33,7	11,4	33,9	7,57	59,0	16,4
Arcilla	18,8	37,1	22,9	34,0	34,0	9,17	16,5	61,4
CC	24,2	15,1	23,4	20,6	29,9	6,05	25,4	15,0
PMP	13,6	17,0	13,0	23,2	17,1	6,63	14,3	16,8
PT	30,7	2,99	39,0	11,8	21,3	18,3	40,7	18,0
Da	1,64	2,35	1,62	6,39	1,68	6,43	1,53	1,71
Dr	2,42	4,53	2,58	7,31	2,14	3,18	2,50	7,51
MO	18,6	10,1	13,2	25,2	16,1	18,1	15,7	10,0
IEE	28,2	18,3	23,1	14,2	23,7	18,8	20,7	10,5
lb	13,6	2,05	13,5	4,99	13,3	3,77	14,0	1,88
K	1,02	4,21	1,05	22,9	1,03	25,2	0,99	11,9

En la zona 2 se observa, mayor contenido de partículas gruesas haciendo referencia a un suelo más suelto permitiendo una mejor infiltración del agua en suelo, situación que se debe tener en cuenta al momento de diseñar sistemas de riego y drenaje, puesto que, al no tener una estructura el suelo, se puede provocar derrumbe de los taludes y generar erosión. Además, según Jiménez & Siavosh (2005), estas partículas presentan

características deficientes de retención de humedad y nutrientes, situación importante en la toma de decisión de planes de fertilización.

En la zona 3 se observa, la capacidad del suelo para retener humedad, por sus contenidos de Arcilla, a través de las variables CC, PMP situación que incide en el diseño y planificación de calendarios de suministro de agua, cubriendo las necesidades hídricas del cultivo, evitando pérdidas de producción por excesos o déficit de agua.

Finalmente, para el horizonte A, en la zona 4, se observa altos porcentajes de espacio poroso y de Limo, se puede comprender que, al no existir un suministro periódico de agua en el área, las partículas de limo asociadas a la de arcilla, se agrupan al sufrir sequías generando pequeñas grietas, que aceleran la infiltración de agua, actividad que también es representativa de la zona 4 (Figura 10).

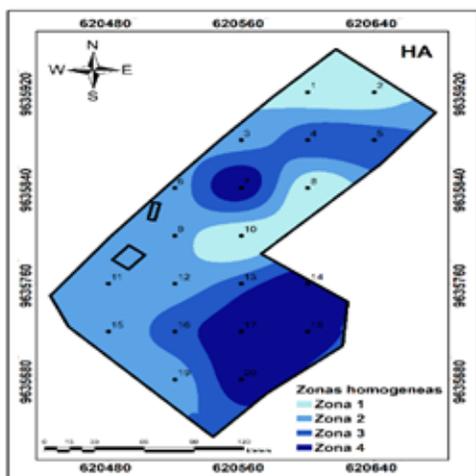


Figura 10. Zonas homogéneas delimitadas en el Horizonte A.

Para el horizonte B se obtuvo como resultado del método de la silueta dos clústeres representativos (Figura 11).

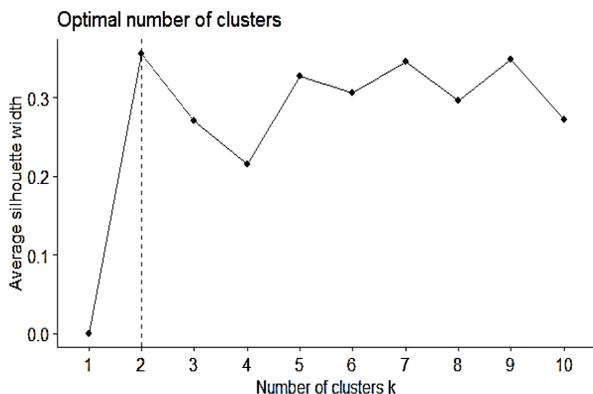


Figura 11. Número óptimo de clúster para HB.

De lo anterior, se delimitaron dos zonas homogéneas que alcanzaron distancias euclidianas de 60 (Figura 12).

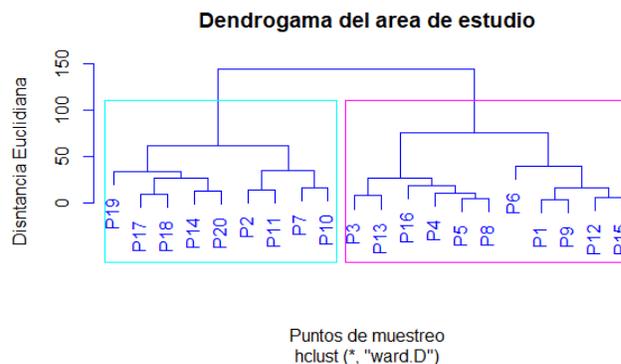


Figura 12. Dendrograma para HB.

En la zona 1 (Tabla 10), son representativas las partículas grandes como la arena y pequeñas como las arcillas, esta última importante en las capacidades de almacenamiento de agua. La distribución de esta zona representa que a una profundidad de 10-20 cm existe una mayor homogeneidad en el predio de las capacidades hídricas al abarcar mayores sitios de muestreo que en al HA.

Tabla 10. Características de las Zonas Homogéneas para HB.

	Zona 1		Zona 2	
	Media	CV	Media	CV
Arena	37,15	24,85	31,62	24,68
Limo	32,46	15,21	54,49	16,56
Arcilla	30,39	18,48	13,89	67,01
CC	27,51	14,55	22,82	19,48
PMP	15,64	16,08	12,69	22,01
PT	31,42	32,05	33,77	29,58
Da	1,67	8,74	1,64	8,81
Dr	2,46	9,51	2,50	8,68
MO	13,94	15,09	14,40	16,33
IEE	22,36	12,88	21,06	12,07

La zona 2 del HB (Figura 13) coincidió con la zona 4 del HA, ambas representaron las propiedades Limo y porosidad total en la misma área homogénea, con la diferencia que a mayor profundidad el contenido de MO fue menor, pero más homogéneo en los sitios de muestreo.

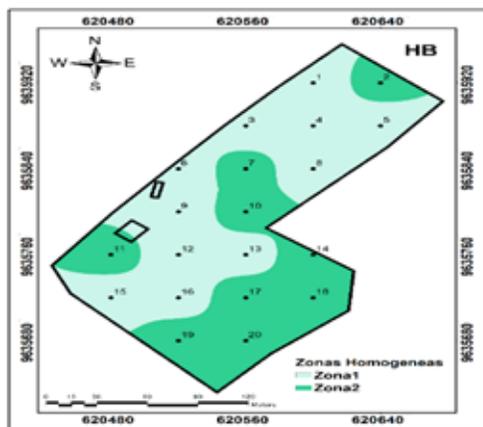


Figura 13. Zonas homogéneas delimitadas en el Horizonte B.

Según Flores & Alcalá (2010), la porosidad total está en función de factores como la estructura, textura y contenido de materia orgánica, situación que se evidencia en la zona 2 pues es representativa de un alto contenido de M.O, clase textural de tipo franca y con una estructura estable dando como resultado un porcentaje de Porosidad Total de 33.77, ubicándose en una clase alta según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2009).

En general a mayor profundidad, las propiedades presentan menor variabilidad lo que se denota con la diferencia en el agrupamiento de las variables en ambos perfiles, las zonas delimitadas tanto para HA como para HB son importantes y decisivas en el aumento de la producción mediante la integración de prácticas tanto culturales como de fertilización.

## CONCLUSIONES

El suelo del área de estudio es estructuralmente estable, con porcentajes altos de materia orgánica. Sin embargo, existen sitios con valores de densidad aparente altos causados por agrupamientos densos de partículas pequeñas como respuesta a la escasez del recurso agua.

Todas las variables se ubicaron en una clasificación de moderada a relativamente homogénea por su CV a diferencia de la Arena que se ubicó en normalmente heterogéneas por su alto porcentaje del coeficiente de variación, así mismo los valores promedio de las propiedades en HA son representativas en HB al presentar significancia mayor al p-valor en todas las medias.

Las propiedades hidrofísicas del suelo presentaron dependencia espacial débil, a excepción de la densidad aparente y porosidad total que se calificaron como fuerte y moderada respectivamente.

En la determinación del comportamiento espacial los modelos teóricos que mejor se ajustaron a las propiedades de estudio fueron el Esférico y Gaussiano, presentando coeficientes de determinación y Nash

mayor a uno y un error cuadrático medio menor entre todos los modelos.

Se delimitaron cuatro zonas homogéneas en el primer perfil de estudio con una distancia euclidiana de 50 y dos en el segundo perfil con distancia euclidiana de 60. Permitiendo diferenciar zonas de mayor y menor influencia para ejercer un eficaz plan de evaluación y monitoreo de la calidad del suelo. La mejor producción se encontró en el cultivar ISC-95 en los puntos 4 y 8 con un promedio de número de mazorcas de 20 y 25 respectivamente.

Finalmente, el comportamiento espacial de las propiedades hidrofísicas no inciden de forma directa en la producción del área, puesto que ésta es baja principalmente por un mal manejo agronómico, resaltando tres puntos importantes: No se satisface las necesidades hídricas del cultivo, Escasez de podas de mantenimiento y recuperación y Mal manejo de plagas y enfermedades.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Asociación Nacional de Exportadores. de Cacao e Industrializados del Ecuador. (2019). Sector Exportador de Cacao. ANECACAO. <http://www.anecacao.com/index.php/es/estadisticas/estadisticas-actuales.html>
- Flores, L., & Alcalá, J. (2010). Manual de Procedimientos Analíticos. <http://www.geologia.unam.mx/igl/deptos/eda-fo/lfs/MANUALDELABORATORIODEFISICADESUELOS.pdf>
- Godwin, R., & Miller, C. (2003). Review of the technologies for mapping within-field variability. *Biosystems Engineering*, Amsterdam, 84, 393-407.
- Heredia, E. (2013). Densidad real, aparente y porosidad del suelo. Pontificia Universidad Católica de Perú. [https://www.academia.edu/7716432/DENSIDAD\\_REAL\\_APARENTE\\_Y\\_POROSIDAD\\_DEL\\_SUELO](https://www.academia.edu/7716432/DENSIDAD_REAL_APARENTE_Y_POROSIDAD_DEL_SUELO)
- Jiménez, A., & Siavosh, S. (2005). La densidad aparente y su relación con otras propiedades en suelos de la zona cafetera Colombiana. *Cenicafé*, 56(4), 381 - 397.
- Kitchen, N. R., Sudduth, K. A., Myers, D. B., Drummond, S. T., & Hong, S. Y. (2005). Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46, 285 - 308.
- Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. (2009). Guía para la descripción de Suelos. FAO. <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2016000087>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2020b). Sitio Oficial. FAOSTAT. <http://www.fao.org/faostat/en/#home>

- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2020a). Degradación de suelos. FAO. <http://www.fao.org/soils-portal/soil-degradation-restoration/en/>
- Orjuela-Matta, H. M., Rubiano-Sanabria, Y., & Camacho-Tamayo, J. H. (2012). Spatial Analysis of Infiltration in an Oxisol of the Eastern Plains of Colombia. *Chilean Journal Agricultural Research*, 72, 404-410.
- Romero Macas, D. J. (2017) Evaluación del estado actual de degradación del suelo en Agroecosistemas de cacao y pasto en la granja Santa Inés. (Tesis de Pregrado). Universidad Técnica de Machala.
- Sánchez, V., Zambrano, J., & Iglesias, C. (2019). La cadena de valor del cacao en América Latina y el Caribe. Quito, Ecuador: INIAP, Estación Experimental Santa Catalina. <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5382>
- Valbuena, C., Martínez, L., & Henao, R. (2008). Variabilidad espacial del suelo y su relación con el rendimiento de mango (*Mangifera indica* L). *Revista Brasileira de Fruticultura*, 30, 1146-1151.
- Varón Ramírez, V. M. (2016). Caracterización de las propiedades hidrofísicas de los suelos del Centro Agropecuario Marengo CAM y su incidencia en su capacidad productiva. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia.
- Vásquez Polo, J. R. (2009). Caracterización de la variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas en los suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Colombia.
- Villaseñor, D. (2016). Fundamentos y procedimientos para análisis físicos y morfológicos del suelo. Universidad Técnica de Machala.