



Comportamiento espacial de indicadores fisicoquímicos y calidad del suelo en plantación de *Theobroma cacao* en Padre Abad, Ucayali, Perú

Spatial behavior of physicochemical indicators and soil quality in *Theobroma cacao* L. plantation in Padre Abad, Ucayali, Peru

Erika Tereza Inocencio-Vasquez¹ ; Nelino Florida-Rofner^{1*}

¹Universidad Nacional Agraria de la Selva, Facultad de Recursos Naturales Renovables, Departamento de Ingeniería en Conservación de Suelos y Agua. Tingo María, Perú; e-mail: erika.inocencio@unas.edu.pe, nelinof@hotmail.com

*autor de correspondencia: nelinof@hotmail.com

Cómo citar: Inocencio-Vasquez, E.T.; Florida-Rofner, N. 2022. Comportamiento espacial de indicadores fisicoquímicos y calidad del suelo en plantación de *Theobroma cacao* en Padre Abad, Ucayali, Perú. Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient. 25(2):e2320. <http://doi.org/10.31910/rudca.v25.n2.2022.2320>

Artículo de acceso abierto publicado por Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica, bajo una Licencia Creative Commons CC BY-NC 4.0

Publicación oficial de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales U.D.C.A, Institución de Educación Superior Acreditada de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional.

Recibido: julio 18 de 2022

Aceptado: octubre 18 de 2022

Editado por: Helber Adrián Arévalo Maldonado

RESUMEN

El cultivo de cacao en el trópico peruano presenta bajos rendimientos, lo que exige buscar alternativas para aumentar la producción. Frente a esta situación, los estudios geoespaciales facilitan el diagnóstico de fertilidad y la aplicación de planes de fertilización. Por lo tanto, se evaluó la distribución espacial de indicadores fisicoquímicos y calidad del suelo en Padre Abad, región Ucayali, Perú. Se evaluaron indicadores fisicoquímicos y la calidad del suelo y se sometieron al análisis geoestadístico, a través del interpolador Kriging, encontrándose coeficientes de variación bajos para arcilla, pH y potasio K y medios para arena, limo, materia orgánica (MO), nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K⁺), calcio (Ca²⁺), magnesio (Mg²⁺), aluminio (Al³⁺), capacidad de intercambio de cationes (CIC), saturación de bases (SB), acidez cambiante (AC) y saturación de aluminio (SAL). La calidad del suelo varió entre baja a muy baja, con una distribución espacial de 52,24 y 47,76 %. El análisis de componentes principales encontró significancia para arena, limo,

MO, N, K⁺, Al³⁺, CIC, %AC, %BC y %SAL, todos presentan variación espacial, según su nivel de fertilidad, excepto K⁺. Los modelos de interpolación con mejores ajustes fue el exponencial y lineal con dependencia espacial fuerte para arena, limo y K, moderada para MO, N, Al, CIC, %SAL e índice de calidad del suelo y débil para %BC y %AC, con una eficiencia de predicción confiable. Se encontró alta variabilidad espacial con valores medios de los diferentes indicadores de fertilidad bajos, no favorables para el desarrollo del cultivo de cacao.

Palabras clave: Coeficiente de variación; Geoestadística; Índice de calidad; Kriging.

ABSTRACT

Cocoa cultivation in the Peruvian tropics has low yields, which requires seeking alternatives to increase the production. Faced with this situation, geospatial studies facilitate the diagnosis of

fertility and the efficient application of fertilization plans. Therefore, the spatial distribution of physicochemical indicators and soil quality in Padre Abad, Ucayali region, Peru were evaluated. Physicochemical indicators and soil quality were evaluated and subjected to geostatistical analysis through the Kriging interpolator, finding low coefficients of variation for clay, pH and potassium (K^+), and medium for sand, silt, organic matter (OM), nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K^+), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), aluminum (Al^{3+}), cation exchange capacity (CEC), base saturation (BS), exchangeable acid (EA) and aluminum saturation (AIS). Soil quality ranged from low to very low quality with a spatial distribution of 52.24 % and 47.76 % respectively. Principal component analysis found significance for sand, silt, OM, N, K^+ , Al^{3+} , CEC, %EC, %BS and %AIS, all showing spatial variation according to their fertility level, except K^+ . The interpolation models with best fits were the exponential and linear with strong spatial dependence for sand, silt and K^+ , moderate for MO, N, Al, CEC, %AIS and soil quality index (SQI), and weak for %BS and %EC, with reliable prediction efficiency. The research found high spatial variability with low mean values of the different fertility indicators, not favorable for cocoa crop development.

Keywords: Coefficient of variation; Geostatistics; Quality index; Kriging.

INTRODUCCIÓN

El *Theobroma cacao* es el segundo cultivo más importante, después del plátano, en la provincia Padre Abad y primer productor de la región Ucayali. El Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, MIDAGRI (2021) reporta una cifra récord de 151, 6 mil toneladas, en el 2020, donde Ucayali, es el tercer productor nacional, con 17 mil toneladas, que representa el 12,5 % de la producción. Además, es importante destacar que la región Ucayali presenta la mayor tasa de incremento en la producción promedio anual de 36,6 %, en los últimos diez años, cuya variedad más difundida es la CCN-51; sin embargo, el rendimiento de 840 kg/ha sigue siendo deficiente (Florida-Rofner, 2021; MIDAGRI, 2021), en comparación con países, como Tailandia y Guatemala, con rendimientos de 2,5 a 3 t/ha (MINAGRI, 2016). Se atribuye los bajos rendimientos en plantaciones de cacao de la provincia Padre Abad a deficiencias técnicas en el manejo y a falta de planes de fertilización.

La agricultura en el trópico peruano se desarrolla bajo técnicas de manejo orgánico y convencional, en ambos casos, con deficiencias técnicas en el manejo de la fertilidad (Florida-Rofner & Acuña-Núñez, 2020), en parte, resultado de una variabilidad espacial de moderada a media en distancias cortas, de los diferentes indicadores de calidad del suelo (Panday *et al.* 2018). Frente a ello, las herramientas geoestadísticas, como el método de interpolación Kriging (Villatoro *et al.* 2008; Jaramillo J., 2012; Chinea-Horta & Rodríguez-Izquierdo, 2021), permiten determinar la variabilidad espacial de los atributos del suelo (Córdoba *et al.* 2014),

información confiable y útil para la elaboración de diagnósticos de fertilidad (Vásquez Polo *et al.* 2010) y la aplicación eficiente de planes de fertilización (Henríquez *et al.* 2013; Gamble *et al.* 2018).

El fundo Cárdenas, maneja 3,35 ha de cacao CCN-51, en un suelo fuertemente ácido y con aparentes deficiencias nutricionales, por la disparidad en el tamaño, producción y vigor dentro de la misma plantación, por lo que, la aplicación de un plan de fertilización sin el estudio correspondiente, no resultaría eficiente y podría generar pérdidas al productor y daños ambientales. Frente a esta realidad, este trabajo se justifica en la búsqueda de un método práctico, que resuelva el problema que afecta a productores de la provincia Padre Abad, en la región Ucayali-Perú y determine la variabilidad espacial de la calidad del suelo, para un mejor diagnóstico de la fertilidad de sus tierras y optimizar la aplicación de planes de fertilización.

En este contexto, esta investigación tiene como objetivo determinar el comportamiento espacial de indicadores fisicoquímicos y de calidad del suelo en Padre Abad, región Ucayali-Perú. Esta Información, se convertirá en una alternativa a ser considerada por productores locales y las instituciones que promueven el desarrollo de proyectos productivos en la zona.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El lugar donde se desarrolló la investigación, se encuentra en la jurisdicción del poblado de Nuevo Progreso, políticamente, el centro poblado pertenece al distrito y provincia de Padre Abad, en la región Ucayali. El fundo "Cárdenas", se ubicada a 8°54'23" latitud Sur y 75°29'34" longitud Oeste y cultiva cacao CCN-51, con plantación de 8 años de producción, distanciamiento de siembra de 3x3 m y recibe un manejo tradicional a base de poda anual del 30 %, control manual de malezas y no aplica ningún tipo de agroquímicos.

Según Holdridge (2000), el área pertenece al ecosistema de bosque muy húmedo - Premontano Tropical (bmh-PT) y las condiciones climáticas generales, que presentan una temperatura media anual de 26,2 °C, la máxima de 26,6 °C y la mínima de 25,9 °C; humedad relativa de 84 % y precipitación anual de 2800 mm (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, SENAMHI, 2022). Según Pulgar Vidal (2014), el área pertenece a la ecorregión Omagua o selva baja, teniendo como principal fuente hídrica, el río Aguaytía.

Muestreo. Consistió en determinar los puntos de los vértices del área cultivada en el fundo Cárdenas (Figura 1), excluyendo el área de bosque secundario. Se realizó el muestreo cada 30 m, en tres hileras paralelas, de forma sistemática, en las 3,35 ha cultivadas del fundo y la extracción de 28 muestras; se realizaron tomando en cuenta los criterios de la Guía para el muestreo de suelos del Ministerio del Ambiente, MINAM (2014).

Análisis de suelos. El análisis granulométrico, se realizó por medio del método del hidrómetro de Bouyoucos. Los valores de pH en agua destilada (relación 1:2,5), debidamente calibrado

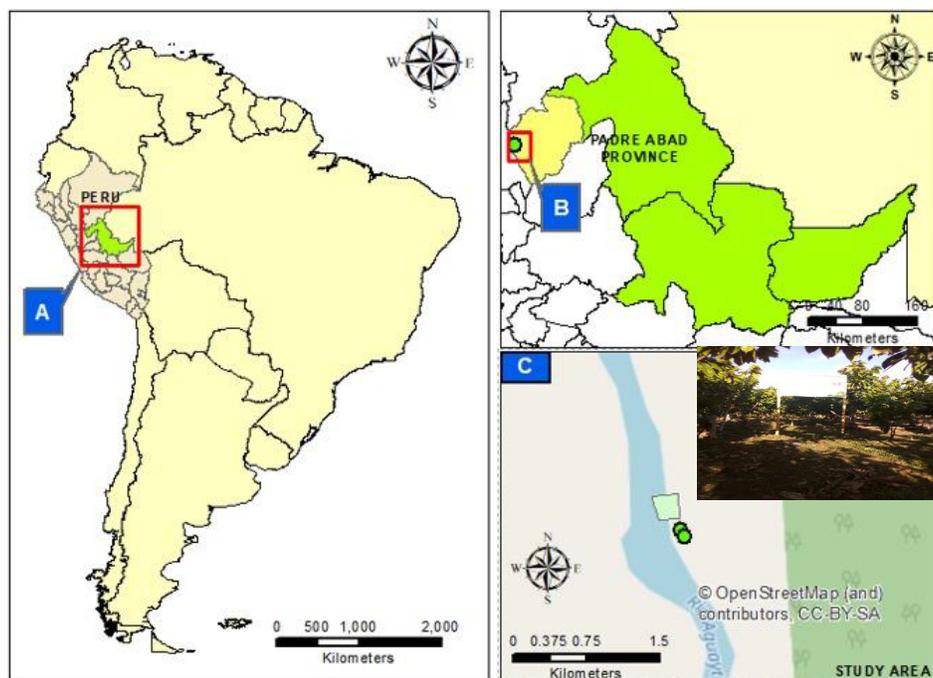


Figura 1. Localización geográfica del fundo Cárdenas, Padre Abad, Ucayali, Perú.

con soluciones patrón de pH 4,0 y 7,0. El Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ y Na^+ fueron extraídas con acetato de amonio a pH 7 y determinadas por absorción atómica. El Al^{3+} e H^+ fueron extraídas con KCl y determinadas por titulación con solución de NaOH 0,05 mol L^{-1} . El contenido de P disponible por Olsen modificado extraído con solución de NaHCO_3 0,5 mol L^{-1} a pH 8,5 y determinado por colorimetría. El contenido de carbono orgánico (CO), se determinó conforme a Walkley & Black (1934) y la CIC, mediante saturación por acetato de amonio (CH_3COOH) a pH 7; los protocolos para su determinación, se describen en Bazán Tapia (2017).

Calidad del suelo. Con los datos obtenidos de los diferentes indicadores físicos y químicos del suelo, se determinó el índice de calidad del suelo (ICS), a través del Subíndice de uso sustentable del suelo (SUSS), propuesto por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura-FAO y la Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural-FAO & Sagarpa (2012). Además, la determinación de la clase de calidad se realizó con los rangos de calidad, propuesta por Cantú *et al.* (2007) y FAO & Sagarpa (2012).

Distribución espacial. En cada punto muestreado se determinó la ubicación, mediante el contacto directo con el terreno, a través de un sistema de posicionamiento global (GPS).

La geolocalización, se realizó con el Sistema Universal de Mercator (UTM), en el Datum WGS 84, Zona 19 L hemisferio sur. Los resultados de caracterización del suelo se analizaron, a través del software ArcGIS 10.5 y para el proceso de interpolación, se utilizó el interpolador Kriging Ordinario o Kriging simple, que permite generar superficies a partir de aproximaciones geoestadísticas, con la finalidad de determinar áreas de tipo ráster que, posteriormente, se convirtió en polígonos de formato vectorial (ESRI Shapefile); la escala de trabajo fue de 1/2500. La distribución espacial, a nivel

detallado de los diferentes indicadores físicos, químicos, se realizó según los niveles de fertilidad, descritos por Bazán Tapia (2017) y la calidad del suelo (ICS), se clasificó según Cantú *et al.* (2007).

Análisis exploratorio de datos. Se consideraron tres aspectos básicos:

-El tipo de distribución de los datos, haciendo uso de la herramienta Geostatistical Analysis > Explore Data > Histogram, buscando la opción que más se ajustó a una distribución normal.

-Análisis de datos estacionarios o fijos, para estimar que la variación local no cambie en diferentes áreas del mapa; se comprobó la estacionariedad de los datos, utilizando el mapa Voronoi, en ArcGIS, herramienta Geostatistical Analysis > Explore Data > Voronoi Map.

-Análisis de tendencias, con la herramienta Geostatistical Analysis > Explore Data > Trend Analysis, para generar los mapas temáticos de distribución espacial, según los niveles críticos de fertilidad.

Modelo de interpolación. Con la herramienta Geostatistical Analysis > Geostatistical Wizard y Geostatistical methods Kriging, analizar con Kriging type >ordinario (KO) y simple (KS) y se evaluaron los variogramas experimentales y se ajustaron a semivariograma teóricos, utilizando, como parámetros de selección, valores menores de la suma de cuadrados de residuos. A partir de los variogramas ajustados, se generó los mapas de geo distribución e interpolación para cada variable del suelo.

Validación de los métodos de interpolación. Se realizó mediante validación cruzada, la cual, consistió en extraer 5 % de los análisis de suelos colectados, para validar las interpolaciones efectuadas en ausencia de estos datos; se ubicó las coordenadas de los datos

ausentes, para compararlos con los datos interpolados; los métodos de interpolación, se calcularon mediante dos índices estadísticos, a partir de los valores medidos e interpolados, como el error medio (ME), la raíz del error cuadrático medio (RMSE). Se tomaron en cuenta los indicadores estadísticos, como es el ME, que sea próximo o cercano a 0 y la RMSE debe ser lo más pequeño posible, para una interpolación precisa.

Comparación de los métodos de interpolación. Se realizó utilizando indicadores estadísticos, como el error cuadrático medio (MSE) y la eficiencia de predicción (E), para definir la aplicación del KO y KS, para cada indicador evaluado.

Análisis estadístico. Se realizó el análisis de componentes principales (ACP), previo al análisis geoestadístico de la variabilidad espacial; el ACP permitió identificar a los indicadores más relevantes que explican la varianza total encontrada entre los diferentes indicadores evaluados, a través de componentes o factores principales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Indicadores fisicoquímicos del suelo. En la tabla 1, se presenta la estadística descriptiva general, el nivel o clase que corresponda a cada indicador de suelos cultivados con cacao, de acuerdo con los valores de la media encontrada.

Considerando los valores mínimos y máximos y los criterios de clasificación de FAO & Sagarpa (2012) y Bazán Tapia (2017), el área presenta indicadores que varían en su nivel o clase, entre ellos: textura entre Franco arcilloso, Franco y Franco limoso; nivel medio a alto en MO, N y %AC; bajo a medio en P y CIC; bajo a muy bajo en Ca^{2+} y Mg^{2+} ; alto a muy alto en Al y %SAl; sin embargo, algunos indicadores no presentaron cambios en su nivel crítico, entre ellos, el K⁺ (nivel bajo) y el pH permaneció en el nivel fuertemente ácido. Además, los valores medios encontrados no son favorables para el desarrollo del cultivo de cacao, en el área de estudio.

La textura media del suelo es franca, es un excelente indicador, por su relación con otras características físicas del suelo, como Da, Rp, porosidad, retención hídrica, aireación y contenido de MO (FAO, 2009; FAO & Sagarpa, 2012; Camacho-Tamayo *et al.* 2017). Este resultado revela una condición física favorable, considerando al cacao como cultivo principal para la zona (MINAGRI, 2016).

Se encontró un pH fuertemente ácido, el nivel corresponde a suelos ácidos con deficiencias de bases cambiables (Ca^{2+} y Mg^{2+}), contrastándose con los niveles medios de estos cationes (bajos en Ca^{2+} a muy bajos en Mg^{2+}); estas son condiciones que, normalmente, se presentan a estos niveles de pH (Bohn *et al.* 1993; Navarro Blaya

Tabla 1. Estadística descriptiva de indicadores evaluados en suelos cultivados con cacao, en Nuevo Progreso, Padre Abad.

Indicador	Mínimo	Máximo	Media	CV	Nivel o Clase media
Arena (%)	12,96	49,96	31,85±11,75	36,89	Franco
Arcilla (%)	19,76	31,76	26,73±3,14	11,75	
Limo (%)	25,88	60,88	41,42±10,82	26,12	
pH	3,81	4,75	4,23±0,24	5,67	Fuertemente ácido
MO (%)	1,76	4,13	3,1±0,67	21,61	M
N (%)	0,09	0,21	0,15±0,03	20,00	M
P (ppm)	0,58	6,62	2,54±1,19	46,85	B
K ⁺ (Cmol ⁽⁺⁾ /Kg)	80,64	97,48	90,59±4,23	4,67	B
Ca ²⁺ (Cmol ⁽⁺⁾ /Kg)	1,13	4,55	2,42±0,93	38,43	B
Mg ²⁺ (Cmol ⁽⁺⁾ /Kg)	0,16	0,82	0,34±0,16	47,06	MB
Al ³⁺ (Cmol ⁽⁺⁾ /Kg)	2,49	7,61	3,91±1,22	31,20	A
CIC (Cmol ⁽⁺⁾ /Kg)	5,27	15,82	8,29±2,21	26,66	B
SB (%)	14,53	50,35	33,18±9,31	28,06	B
AC (%)	49,65	85,47	66,82±9,31	13,93	A
SAl (%)	33,45	69,12	47,22±8,16	17,28	A
ICS	0,08	0,37	0,20±0,08	40,00	BC

CV, coeficiente de variación; ICS, índice de calidad del suelo; A, alto; M, medio; B, bajo; MB, muy bajo; BC, baja calidad; ± desviación estándar.

& Navarro García, 2003; Rosas-Patiño *et al.* 2017). Además, la alta pluviometría de la zona y las texturas francas encontradas generan pérdida de bases por lavado, lo que explicarían estos niveles de pH (FAO & Sagarpa, 2012; Havlin *et al.* 1999; Bohn *et al.* 1993).

Los resultados muestran que los valores encontrados de pH no cambian de nivel crítico y tampoco son condiciones favorables para los cultivos. Además, coinciden con los reportes de Florida Rofner *et al.* (2019), al evaluar el efecto del compost y NPK en la

parte central, dentro de este fundo. También, Celis-Tarazona *et al.* (2020) reportan valores medios similares, en áreas con diferentes sistemas de manejo, adyacentes al fundo Cárdenas.

La MO y N presenta en promedio nivel medio, indicadores favorables para la fertilidad del suelo, por su efecto directo sobre la regulación del aluminio y procesos fisicoquímicos importantes (Navarro Blaya & Navarro García, 2003; FAO & Sagarpa, 2012). Los resultados muestran amplia variabilidad entre 1,76 a 4,13 % de MO y 0,09 – 0,21 % de N, valores relativamente mayores a los de Florida Rofner *et al.* (2019). También, Celis-Tarazona *et al.* (2020) reportan valores medios que varían entre 1,58 a 1,79 % MO, en áreas de cacao convencional y bosque.

Los resultados de MO fueron relativamente más altos, en comparación con los estudios desarrollados en el área (Florida Rofner *et al.* 2019) y en el entorno (Celis-Tarazona *et al.* 2020); estos resultados, se pueden explicar considerando que el muestreo en este trabajo se realizó en temporada lluviosa, que genera un crecimiento rápido de plantas no deseadas, la dominancia de la gramínea *Axonopus compressus* (torourco) y el no uso de herbicidas en el área. Este comportamiento fue evidenciado por Navarro Vásquez *et al.* (2018), quienes encontraron altos niveles de MO en áreas de pastos con gramínea, atribuidos a una mayor exploración del sistema radicular, que contribuye a elevar los contenidos de MO y N del suelo; sin embargo, advierten que este comportamiento no significa condiciones óptimas de calidad del suelo.

Respecto al Al^{3+} , %AC y %Sal, todos presentaron niveles altos, considerados tóxicos para los cultivos (FAO & Sagarpa, 2012). Los valores son poco favorables para el desarrollo del cacao, a pesar de tener valores medios a altos en MO; esto concuerda con lo señalado por Navarro Vásquez *et al.* (2018). Además, estos resultados son propios de suelos fuertemente ácidos, con alta pluviometría y lavado de bases, que favorecen el incremento de Al^{3+} , %AC y %SAL y disminución de la CIC (Bohn *et al.* 1993; Havlin *et al.* 1999), condiciones que se evidencian en los resultados y concuerdan con los valores encontrados por Florida Rofner *et al.* (2019) y Celis-Tarazona *et al.* (2020), quienes encontraron valores altos de Al, AC y saturación de aluminio.

En la tabla 1, los valores de CV oscilan entre 4,67 (K^+) a 47,06 (Mg^{2+}). Según la clasificación del CV, en propiedades del suelo de Warrick & Nielsen (1980), se observa un coeficiente de variación baja (CV < 12 %), para arcilla, pH y K; estos últimos, se contrastan con la permanencia en un mismo nivel crítico de fertilidad y de variación media de CV, entre 12-60 %, para el resto de indicadores evaluados (Arena, limo, MO, N, P, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , CIC, SB, AC y SAL). Para China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021), las variaciones se atribuyen a factores de formación y de características agroclimáticas locales; en este caso, generaron variaciones espaciales, aun en un área relativamente pequeña (3,35 ha).

Los resultados de CV concuerdan con Junco *et al.* (2017), quienes estudiaron la distribución espacial de indicadores de calidad del suelo por unidades fisiográficas en la microcuenca río Bella-Las

Palmas; sin embargo, son relativamente menores en comparación con los resultados encontrados por China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021). Respecto a los CV de las diferentes fracciones son similares a lo reportado por China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021). También, concuerdan con los resultados de Acevedo *et al.* (2008), en el Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo, quienes encontraron CV medio para MO, N y P y alto para K; este último, muy superior a lo encontrado en el área de estudio.

Un aspecto para destacar es el bajo CV del pH (5,67); sin embargo, es un valor apropiado y normal para este indicador. Según Acevedo *et al.* (2008), el pH es un indicador del suelo con menores variaciones espaciales, debido a que responde a procesos pedogenéticos del suelo y su coeficiente de variación, frecuentemente, fluctúa entre 2 a 15 %. En general, los resultados evidencian variabilidad media, lo que según China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021), representa una marcada variabilidad del suelo y para Acevedo *et al.* (2008) es el resultado de las características intrínsecas del suelo y el historial de manejo.

Calidad del suelo (ICS). La tabla 1 muestra el cálculo general de los ICS, el valor máximo es de 0,37 y la mínima de 0,08, esto muestra que existe variabilidad de la calidad del suelo en el área evaluada. Al respecto, el valor medio encontrado corresponde, según Estrada-Herrera *et al.* (2017) y Cantú *et al.* (2007), a suelo de baja calidad y para FAO & Sagarpa (2012) son suelos pobres; sin embargo, considerando los valores mínimos y máximos el área varía entre calidad baja a calidad muy baja (Cantú *et al.* 2007; Estrada-Herrera *et al.* 2017).

Los ICS permiten evaluar la condición integral del suelo aplicando principios estadísticos y revela los efectos de las prácticas agrícolas sobre la calidad (Cantú *et al.* 2007). Los resultados consignados en la tabla 5 muestran un CV de 40 %, que representa una Variabilidad media, según Warrick & Nielsen (1980) y demuestra heterogeneidad respecto a la calidad en el área de estudio.

De acuerdo con las categorías de calidad propuestas por FAO & Sagarpa (2012), en el área de estudio, la calidad se encuentra amenazada y los indicadores se alejan de los niveles deseables. Aunque no se han encontrado referencias locales, estos datos se pueden contrastar con los resultados encontrados por Azañero Aquino *et al.* (2020), en diferentes sistemas de uso en selva alta de Huánuco, quienes encontraron suelos de calidad marginal para el sistema coca, sensible en el bosque y aceptable en los sistemas agroforestales. Los resultados son relativamente menores a esta referencia.

Relevancia estadística de los indicadores evaluados. En la tabla 2, se observa el análisis estadístico para determinar la relevancia de los indicadores evaluados. Se encontraron cinco componentes o factores mayores a la unidad, con autovalores de 6,33, para el factor 1 y 1,15, para el factor 5; en conjunto explican el 87,97 % de la varianza total.

Las cargas factoriales obtenidas por Varimax permiten determinar todos los indicadores, que son relevantes en cada componente o

Tabla 2. Varianza total explicada por el ACP, para muestras de suelos cultivados con cacao, en Nuevo Progreso, Padre Abad.

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de cargas al cuadrado de la extracción		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	6,336	39,597	39,597	6,336	39,597	39,597
2	3,122	19,516	59,113	3,122	19,516	59,113
3	2,068	12,925	72,037	2,068	12,925	72,037
4	1,395	8,721	80,758	1,395	8,721	80,758
5	1,154	7,210	87,968	1,154	7,210	87,968
6	0,767	4,791	92,759			
7	0,541	3,379	96,138			
8	0,249	1,557	97,695			
9	0,231	1,447	99,142			
10	0,078	0,486	99,628			
11	0,001	0,004	100,000			

factor, tomando como criterio de selección a indicadores con cargas factoriales mayores a 0,75, por tener el valor de $n < 50$ (28 muestras de suelos). Los indicadores relevantes son AC, BC y Sal, para el Factor 1; MO y N, para el Factor 2; CIC y Al, para el Factor 3; arena y limo, para el Factor 4 y K', para el factor 5. Este análisis excluye a la fracción arcilla, el pH, Ca, Mg y P, por no tener influencia sobre la varianza total encontrada entre los indicadores evaluados; son indicadores que, normalmente, presentan relevancia estadística y explican los cambios en la calidad producto del manejo del suelo. Además, la técnica del ACP permite reducir variables a su menor número, sin perder poder estadístico (Garbanzo-León *et al.* 2017).

Distribución geoespacial. En la tabla 3, se observa la distribución geoespacial general, según nivel, de los indicadores fisicoquímicos relevantes y del índice de calidad del suelo en el fundo Cárdenas; se observa, también, que los indicadores arena, limo, MO, N, CIC, AC, BC y SAI presentan variabilidad en los niveles de clasificación, contrario a los indicadores K y Al, que no presentan variabilidad, según los niveles críticos de clasificación de cada parámetro.

La calidad del suelo calculada, a través del ICS, es una herramienta estadística, que expresa íntegramente el estado de conservación o la calidad del suelo (Estrada-Herrera *et al.* 2017); el resultado evidencia cambios en la distribución espacial, con 52,24 %, de calidad baja y 47,76 % del área presenta calidad muy baja. Esta información es muy importante en la toma de decisiones para un adecuado manejo del fundo Cárdenas y la región. Además, los resultados de distribución concuerdan con lo reportado por Junco *et al.* (2017), en diferentes unidades fisiográficas; los indicadores con mayor variabilidad espacial fueron MO, N, P, K, Ca y Mg; también, China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021) encontraron alta variabilidad para K y P. Los resultados concuerdan con las referencias citadas.

Validación geoestadística. En la tabla 4, se observa el análisis de interpolación geoestadística, a través del interpolador Kriging,

aplicando sus diferentes variantes o tipos que más se ajusten a cada indicador; los resultados muestran mejor ajuste del Kriging ordinario (KO), para el indicador arena y limo y el Kriging simple (KS), para el resto de indicadores relevantes. Además, los modelos que mejor se ajustan a cada indicador son el exponencial para MO y lineal para el resto de indicadores.

Respecto a los modelos exponenciales y lineales que mostraron mejor ajuste, concuerdan con Garbanzo-León *et al.* (2017), quienes encontraron mejores ajustes con el modelo exponencial y lineal, además, de gaussiano y esférico. Por el contrario, China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021), encontraron mejor ajuste con el modelo esférico.

El semivariograma experimental es una herramienta fundamental en el análisis geoestadístico; los elementos del variograma establecen la estructura de correlación espacial de los indicadores evaluados. En la tabla 4, se presentan los valores del Nugget, Sill, Rango y el grado de dependencia espacial GDE. Los valores del Nugget son cercanos a cero, para MO, N, K, Al, CIC, Ac, SAI e ICS y valores altos, para arena, limo y %BC. Los valores altos del nugget expresan alta variabilidad en campo y posibles errores instrumentales en la medición, por ello, Jaramillo J. (2012) y China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021) recomiendan tener nugget cercano a cero o valores menores en comparación al Sill; este último, representa el valor máximo de la semivarianza.

El Rango es un elemento importante del variograma; es el valor que establece el límite de pérdida de correlación (Jaramillo J., 2012). Los valores encontrados varían entre 82,29, para K y 363,5 m, para MO; son valores altos en comparación a la distancia entre los puntos muestreados (30 m). El rango establece una distancia límite, en el que los puntos ya no se consideran correlacionados, por ello, entre más grande sea el rango, más cerca se está del modelo de dependencia espacial (Villatoro *et al.* 2008; Jaramillo J., 2012). Por lo tanto, los rangos encontrados son superiores a 80 m, siendo que el intervalo

Tabla 3. Distribución espacial de indicadores fisicoquímicos y calidad del suelo, en suelos cultivados con cacao, en Nuevo Progreso, Padre Abad.

Indicador	Descripción			
	Intervalo	Nivel	Área (ha)	Área (%)
Arena (%)	< 20	Bajo	0,66	19,70
	20-50	Medio	2,69	80,30
Limo (%)	20-50	Medio	2,50	74,63
	50-85	Alto	0,85	25,37
MO (%)	1,5-3,5	Medio	2,58	77,01
	3,5-6	Alto	0,77	22,99
N (%)	0,05 – 0,1	Bajo	0,03	0,90
	0,1-0,15	Medio	1,15	34,33
	0,15-0,25	Alto	2,17	64,78
K (ppm)	<100	Bajo	3,35	100,00
Al (Cmol ⁽⁺⁾ /Kg)	> 1	Muy alto	3,35	100
CIC (Cmol ⁽⁺⁾ /Kg)	5 - 15	Bajo	0,03	0,90
	15 - 25	Medio	3,32	99,10
AC (%)	> 50	Alto	3,34	99,70
	35 - 50	Medio	0,01	0,30
BC (%)	< 35	Bajo	2,06	61,49
	35-50	Medio	1,28	38,21
	> 50	Alto	0,01	0,30
SAI (%)	30 - 60	Alto	3,24	96,72
	> 60	Muy alto	0,11	3,28
ICS	0,20 - 0,39	Baja calidad	1,75	52,24
	0,00 - 0,19	Muy baja calidad	1,60	47,76

Tabla 4. Parámetros del variograma aplicando Kriging, para indicadores fisicoquímicos y calidad del suelo, en suelos cultivados con cacao, en Nuevo Progreso, Padre Abad.

Indicador	Descripción						R ²
	Tipo	Modelo	Nugget	Sill	Rango	GDE (%)	
Arena (%)	Ko	Lineal	45,2914	196,6458	222,89	23,03	0,74
Limo (%)	Ko	Lineal	20,1615	177,9503	209,2	11,33	0,86
MO (%)	Ks	Exponencial	0,4958	1,2825	363,5	38,66	0,71
N (%)	Ks	Lineal	0,7562	1,2686	308,05	59,61	0,36
K (ppm)	Ks	Lineal	0,00	1,1675	82,29	0,00	0,94
Al (Cmol ⁽⁺⁾ /Kg)	Ks	Lineal	0,4497	0,9462	266,88	47,53	0,52
CIC (Cmol ⁽⁺⁾ /Kg)	Ks	Lineal	0,5259	1,3348	261,05	39,39	0,53
BC (%)	Ks	Lineal	71,3988	90,1414	241,65	79,21	0,33
AC (%)	Ks	Lineal	0,8548	1,0792	241,65	79,21	0,34
SAI (%)	Ks	Lineal	0,6245	1,1662	214,03	53,55	0,39
ICS	KS	Lineal	0,5248	1,0035	291,51	52,29	0,51

de muestreo utilizado (30 m) permitió identificar la dependencia espacial dentro del fundo Cárdenas; resultados similares fueron encontrados por China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021), entre 750 hasta 2.000 m. En este contexto, los resultados presentan rangos relativamente bajos; esto indica alta variabilidad espacial de los indicadores evaluados y la autocorrelación se pierde en valores cercanos a los rangos encontrados (Henríquez *et al.* 2013).

dependencia espacial; según Cambardella *et al.* (1994) clasificaron, como fuerte dependencia espacial, valores < 25 %; moderada dependencia, a valores entre 25-75 % y débil, valores mayores a 75 %. Los resultados varían entre 0 a 79,21 y muestran dependencia espacial fuerte, para arena, limo y K; dependencia espacial moderada, para MO, N, Al, CIC, SAI e ICS, los indicadores BC y AC muestran dependencia espacial débil.

El grado de dependencia espacial (GDE) resulta de la relación del efecto nugget/sill (Jaramillo J., 2012) y se tienen diferentes clases de

En la tabla 5, se presentan los elementos de validación del análisis de interpolación, los valores del Error Medio (ME) y Raíz del

Error Cuadrático Medio (RMSE). Un elemento importante en la validación es la eficiencia de predicción (EP); según Jaramillo J. (2012), valores de eficiencia de predicción igual a 100 %, indica una predicción perfecta; valores positivos entre 0 a 100 %, indican que las predicciones son más confiables que el uso de la media de la muestra y valores negativos < 0,00, indican que las predicciones son menos confiables que usar la media de la muestra. Los resultados presentan valores entre 8,61 (Al) a 91,60 %, para K, encontrándose todos los indicadores, incluyendo el ICS, en el rango positivo e indican que las predicciones son más confiables que el uso de la media de la muestra. Los resultados de eficiencia de predicción concuerdan con lo encontrado por Villatoro *et al.* (2008), Jaramillo J. (2012) y China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021).

Los resultados de variabilidad espacial fueron mayores en indicadores químicos; este comportamiento concuerda con Jaramillo J. (2012), quien afirma que se presenta una mayor variabilidad en las propiedades químicas frente a las físicas. Además, China-Horta & Rodríguez-Izquierdo (2021) consideran que la técnica de interpolación es una herramienta útil para comprender la variabilidad de las propiedades del suelo en áreas específicas, así como profundizar en el diagnóstico y la recomendación de fertilizantes y enmiendas. También, Acevedo *et al.* (2008) señalan que esta herramienta permite generar mapas para identificar áreas parciales, para ubicar y orientar estudios específicos. Todo esto, enfocado en la agricultura de precisión, que tiene como estrategia de gestión la recopilación, el procesamiento y el análisis de datos

Tabla 5. Validación cruzada y eficiencia de predicción de la interpolación Kriging, para muestras de suelos cultivados con cacao, en Nuevo Progreso, Padre Abad.

Indicador	Descripción			
	ME	RMSE	MSE	EP
Arena	-0,0856	0,9733	7,7399	34,360
Limo	0,1087	1,0477	5,9171	42,787
MO	0,0135	1,1024	0,6709	13,3509
N	0,0006	1,0382	0,0321	10,1438
K	0,0112	0,9508	4,1852	91,607
Al	-0,0001	1,1112	1,0718	14,0378
CIC	-0,0032	1,0168	1,7416	8,6137
BC	-0,1708	1,0408	9,329	33,357
AC	0,1708	1,0408	9,3290	65,224
SAI	-0,0401	1,1771	8,3138	47,982
ICS	0,0013	1,1068	0,0712	10,2003

ME, error medio; RMSE, raíz del error cuadrático medio; MSE, error cuadrático medio; EP, eficiencia de predicción; ICS, índice de calidad del suelo.

temporales y espaciales, para mejorar la eficiencia, la productividad y la sostenibilidad del agroecosistema (Saavedra-Rincón & Chaparro-Anaya, 2022).

Los coeficientes de variación fueron bajos para arcilla, pH y K y media, para arena, limo, MO, N, P, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, CIC, SB, AC y SAI y la calidad del suelo varía entre baja a muy baja calidad; estos suelos, se encuentran amenazados para fines agrícolas y los indicadores se alejan completamente de los niveles deseables. Además, presenta variabilidad media (CV= 40%), que evidencia heterogeneidad y presenta cambios en la distribución espacial, con 52,24 % de calidad baja y 47,76 % del área presenta calidad muy baja.

El ACP encontró relevancia estadística para los indicadores arena, limo, MO, N, K⁺, Al³⁺, CIC, %AC, %BC y %SAI. La distribución espacial encontró variación para la fracción arena, niveles bajo y medio, con 19,70 y 80,30 % del área; limo nivel medio 74,63 y

alto el 25,37 %; MO medio con 77,01 y alto el 22,99 %; N bajo con 0,09, medio 34,33 y alto el 64,78 %; CIC bajo 0,90 y medio el 99,10 %; AC medio 0,30 y alto el 99,70 %; BC bajo 61,49, medio 38,21 y alto el 0,30 % y la SAI alto 96,72 y muy alto el 3,28 % del área total evaluada; sin embargo, no presentaron cambios espaciales el K⁺ y pH, que permanecen en el nivel bajo y fuertemente ácido, respectivamente.

La variabilidad espacial muestra mejor predicción del error con Kriging ordinario para arena y limo y el Kriging simple, para el resto de indicadores, cuyos modelos con mejores ajustes son el exponencial y lineal. Los rangos son bajos e indican alta variabilidad espacial con dependencia espacial fuerte para arena, limo y K; moderada para MO, N, Al, CIC, SAI e ICS y débil para BC y AC, muestran dependencia. La eficiencia de predicción son valores positivos e indican que las predicciones son más confiables que el uso de la media de la muestra.

Los valores medios encontrados de los diferentes indicadores de calidad del suelo son típicos en el trópico húmedo peruano y no son favorables para el desarrollo del cultivo de cacao y los rangos relativamente bajos indican alta variabilidad espacial, que se contrasta con el coeficiente de variabilidad media. Las variaciones, se atribuyen a diversos factores de manejo y de formación del suelo, que requieren ser estudiadas a profundidad.

Conflicto de intereses: El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de los autores, quienes declaran no tener algún conflicto de interés que coloquen en riesgo la validez de los resultados aquí presentados. Este artículo es derivado del trabajo de grado “Distribución espacial de indicadores de calidad fisicoquímica del suelo en el fundo “Cárdenas”, en nuevo progreso Padre Abad 2022” para optar al título de Ingeniero en Conservación de Suelos y Agua de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

REFERENCIAS

1. ACEVEDO, D.C.; ÁLVAREZ SÁNCHEZ, M.E.; HERNÁNDEZ ACOSTA, E.; MALDONADO TORRES, R.; PÉREZ GRAJALES, M.; CASTRO BRINDIS, R. 2008. Variabilidad espacial de propiedades químicas del suelo y su uso en el diseño de experimentos. *Terra Latinoamericana*. 26(4):317-324.
2. AZAÑERO AQUINO, L.; ÑIQUE ALVAREZ, M.; FLORIDA ROFNER, N. 2020. Calidad del suelo en diferentes sistemas de uso en selva alta de Huánuco, Perú. *Tayacaja*. 3(1):112-125. <https://doi.org/10.46908/rict.v3i1.75>
3. BAZÁN TAPIA, R. 2017. Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego. Ministerio de Agricultura y Riego; Instituto Nacional de Innovación Agraria- INIA. (Lima, Perú). 89p.
4. BOHN, H.L.; MCNEAL, B.L.; O'CONNOR, G.A. 1993. *Química del suelo*. 1ª Edición. Editorial Limusa (México). 370p.
5. CAMACHO-TAMAYO, J.; FORERO-CABRERA, N.; RAMÍREZ-LÓPEZ, L.; RUBIANO, Y. 2017. Evaluación de textura del suelo con espectroscopía de infrarrojo cercano en un oxisol de Colombia. *Colombia Forestal*. 20(1):5-18. <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.1.a01>
6. CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*. 58(5):1501-1511. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
7. CANTÚ, M.P.; BECKER, A.; BEDANO, J.C.; SCHIAVO, H.F. 2007. Evaluación de la calidad de suelos mediante el uso de indicadores e índices. *Ciencia del Suelo (Argentina)*. 25(2):173-178.
8. CELIS-TARAZONA, R.; FLORIDA-ROFNER, N.; RENGIFO-ROJAS, A. 2020. Impacto sobre indicadores físicos y químicos del suelo con manejo convencional de coca y cacao. *Revista Ciencia UNEMI*. 13(33):1-9. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol13iss33.2020pp1-9p>
9. CHINEA-HORTA, A.; RODRÍGUEZ-IZQUIERDO, L. 2021. Comportamiento geoespacial de algunas propiedades del suelo en el cultivo de la caña de azúcar. *Revista Ingeniería Agrícola*. 11(1):3-8.
10. CÓRDOBA, M.; BRUNO, C.; AGUATE, F.; TABLADA, M.; BALZARINI, M. 2014. Análisis de la variabilidad espacial en lotes agrícolas. *Manual de buenas prácticas*. Eudecor (Córdoba, Argentina). 119p.
11. ESTRADA-HERRERA, R.; HIDALGO-MORENO, C.; GUZMÁN-PLAZOLA, R.; ALMARAZ-SUÁREZ, J.J.; NAVARRO-GARZA, H.; ETCHEVERS-BARRA, J.D. 2017. Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. *Agrociencia*. 51(8):813-831.
12. FLORIDA-ROFNER, N. 2021. Cadmium in soil and cacao beans of Peruvian and South American origin. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 74(2):9499-9515. <https://doi.org/10.15446/rfnam.v74n2.91107>
13. FLORIDA-ROFNER, N.; ACUÑA-NÚÑEZ, G. 2020. Soil quality with traditional management in the Chambira native community. *Plant, Soil and Environment*. 66:375-380. <https://doi.org/10.17221/144/2020-PSE>
14. FLORIDA ROFNER, N.; PAUCAR GARCÍA, J.; JACOBO SALINAS, S.S.; ESCOBAR-MAMANI, F. 2019. Efecto de compost y NPK sobre los niveles de microorganismos y cadmio en suelo y almendra de cacao. *Revista De Investigaciones Altoandinas*. 21(4):264-273. <http://dx.doi.org/10.18271/ria.2019.503>
15. GAMBLE, J.D.; FEYEREISEN, G.W.; PAPIERNIK, S.K.; WENTE, C.; BAKER, J. 2018. Regression-Kriged soil organic carbon stock changes in manured corn silage-alfalfa production systems. *Soil & Water Management & Conservation*. 81:1557-1566. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.04.0138>
16. GARBANZO-LEÓN, G.; ALEMÁN-MONTES, B.; ALVARADO-HERNÁNDEZ, A.; HENRÍQUEZ-HENRÍQUEZ, C. 2017. Validación de modelos geoestadísticos y convencionales en la determinación de la variación espacial de la fertilidad de suelos del Pacífico Sur de Costa Rica. *In-vestigaciones Geográficas*. 93:20-41. <http://dx.doi.org/10.14350/rig.54706>

17. HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. 1999. Soil fertility and fertilizers; an introduction to nutrient management. 6 ed. Prentice Hall (Estados Unidos). 499p.
18. HENRÍQUEZ, C.; MÉNDEZ, J.C.; MASÍS, R. 2013. Interpolación de variables de fertilidad de suelo mediante el Análisis kriging y su validación. *Agronomía Costarricense*. 37(2):71-82.
<https://doi.org/10.15517/rac.v37i2.12763>
19. HOLDRIDGE, L.R. 2000. Ecología basada en zonas de vida. Quinta reimpresión. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura-IICA (San José, Costa Rica). 216p.
20. JARAMILLO J., D.F. 2012. Variabilidad espacial del suelo: bases para su estudio. *Revista de la Facultad de Ciencias*. 1(1):73-87.
21. JUNCO, W.; RENGIFO, J.; RENGIFO, A. 2017. Distribución espacial de las propiedades físicas y químicas del suelo de la microcuenca Rio Bella-Distrito Mariano Dámaso Beraún - Las Palmas. *Investigación y Amazonía*. 7(3):20-29.
22. MINISTERIO DE AGRICULTURA Y RIEGO, MINAGRI. 2016. Estudio del cacao en el Perú y en el mundo. Un análisis de la producción y el comercio. 90p. Disponible desde Internet en: <https://camcafeperu.com.pe/admin/recursos/publicaciones/Estudio-cacao-Peru-y-Mundo.pdf>
23. MINISTERIO DE DESARROLLO AGRARIO Y RIEGO, MIDAGRI. 2021. Cacao. Observatorio de Commodities. 20p. Disponible desde Internet en: <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2009611/Commodities%20Cacao%3A%20ene-mar%202021.pdf>
24. MINISTERIO DEL AMBIENTE, MINAM. 2014. Guía para el muestreo de suelos. En el marco del Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Suelo. MINAM (Perú). 72p.
25. NAVARRO BLAYA, B.; NAVARRO GARCÍA, G. 2003. Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Segunda edición. Mundi-Prensa (Madrid, España). 510p.
26. NAVARRO VÁSQUEZ, L.; FLORIDA ROFNER, N.; NAVARRO VÁSQUEZ, M. 2018. Sustancias húmicas y agregación en oxisol (Rhodic Eutrudox) con pasto brachiaria y otros sistemas de uso. *Livestock Research for Rural Development*. 30(8):137.
27. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, FAO. 2009. Guía para la descripción de suelos 4ª edición. FAO (Roma). 111p. Disponible desde Internet en: <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>
28. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA, FAO; SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN, SAGARPA. 2012. Subíndice de Uso Sustentable del Suelo - Metodología de Cálculo. 58p.
29. PANDAY, D.; MAHARJAN, B.; CHALISE, D.; SHRESTHA, R.K.; TWANABASU, B. 2018. Digital soil mapping in the Bara district of Nepal using kriging tool in ArcGIS. *PLoS ONE*. 13(10):e0206350.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206350>
30. PULGAR VIDAL, J. 2014. Las ocho regiones naturales del Perú. *Terra Brasilis*. 3:1-20.
<https://doi.org/10.4000/terrabrasilis.1027>
31. ROSAS-PATIÑO, G.; PUENTES-PÁRAMO, Y.J.; MENJIVAR-FLORES, J.C. 2017. Relación entre el pH y la disponibilidad de nutrientes para cacao en un entisol de la Amazonia colombiana. *Revista Ciencia y Tecnología Agro-pecuaria*. 18(3):529-541.
https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num3_art:742
32. SAAVEDRA-RINCÓN, S.; CHAPARRO-ANAYA, Ó. 2022. Desarrollo de una aplicación en Python para mapeo de variabilidad espacial en la agricultura digital. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 26(1):7-27.
<https://doi.org/10.53897/RevAIA.22.26.01>
33. SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA DEL PERÚ, SENAMHI. 2022. Descarga de datos meteorológicos a nivel nacional. Disponible desde Internet en: <https://www.senamhi.gob.pe/?p=descargadatos-hidrometeorologicos>
34. VÁSQUEZ POLO, J.R.; BAENA GARCÍA, D.; MENJIVAR FLORES, J.C. 2010. Variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas en suelos de la granja experimental de la Universidad del Magdalena (Santa Marta, Colombia). *Acta Agronómica*. 59(4):449-456.
35. VILLATORO, M.; HENRÍQUEZ, C.; SANCHO, F. 2008. Comparación de los interpoladores IDW Y Kriging en la variación espacial de pH, Ca, CICE y P del suelo. *Agronomía Costarricense*. 32(1):95-105.
36. WALKLEY, A.; BLACK, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil matter and a proposed modification of the chromic and titration method. *Soil Science*. 37(1):29-38.
37. WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. En: Hillel, D. (Ed). *Applications of soil physics*. Academic Press (New York). p.319-344.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-348580-9.50018-3>