



# Muestreo de fertilidad de suelo e interpolación mediante Kriging ordinario para mapeo temático

## *Soil fertility sampling and interpolation using ordinary Kriging for thematic mapping*

 Eldo Yoel Flores-del Castillo<sup>I\*</sup> and  Osvaldo Delgado-González<sup>II</sup>

<sup>I</sup>Universidad de Sancti Spiritus José Martí Pérez, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Departamento de Agronomía, Sancti Spiritus, Cuba.

<sup>II</sup>Universidad Tecnológica Metropolitana de Chile, Santiago de Chile, Chile.

\*Autor para la correspondencia: Eldo Yoel Flores-del Castillo, e-mail: [yoelfl414@gmail.com](mailto:yoelfl414@gmail.com)

**RESUMEN:** La investigación tuvo como objetivo interpolar variables de fertilidad de suelo mediante Kriging Ordinario para realizar un mapeo temático de un área arrocerá de la Empresa Agroindustrial de Granos "Sur del Jibaro". Se efectuó un muestreo de suelo siguiendo la metodología internacional de la FAO y la NC 36:2009. Los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) fueron empleados para georreferenciar toda la información; con el software Statgraphics se analizó de manera exploratoria los datos, corroborando que las variables PH y MO no se ajustaron a la normalidad. Con el plugin Smart-Map en el software Qgis V 3.36 se determinó que el modelo exponencial es el más adecuado para realizar un ajuste de los datos a la normalidad y para realizar la interpolación. Fueron confeccionados mapas temáticos los cuales representan la variabilidad del contenido de PH, MO; K<sub>2</sub>O y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; la interpolación se reafirmó mediante una validación cruzada donde las métricas proyectaron valores que aseguraron una buena predicción.

**Palabras clave:** georreferenciar, interpolación, mapas, predicción, validación.

**ABSTRACT:** The objective of the research was to interpolate soil fertility variables using Ordinary Kriging to perform a thematic mapping of a rice area of the Agroindustrial Grain Company "Sur del Jibaro". Soil sampling was carried out following the international methodology of FAO and NC 36:2009. Global Positioning Systems (GPS) were used to georeference all the information; with the Statgraphics software, the data was analyzed in an exploratory manner, corroborating that the PH and MO variables did not adjust to normality. With the Smart-Map plugin in the Qgis V 3.36 software, it was determined that the exponential model is the most appropriate to adjust the data to normality and to perform the interpolation. Thematic maps were made which represent the variability of the content of PH, MO, K<sub>2</sub>O and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>; the interpolation was reaffirmed through a cross-validation where the metrics projected values that ensured a good prediction.

**Keywords:** Georeferencing, Interpolation, Maps, Prediction, Validation.

## INTRODUCCIÓN

Con la implementación de Agricultura de Precisión es posible estudiar la variabilidad espacial que posee el suelo a través de técnicas geoestadísticas, estas técnicas permiten la estimación y modelación de la variabilidad de las propiedades físicas del suelo mediante métodos de interpolación precisos como es el caso de Kriging y la semivarianza, estas herramientas son necesarias en geoestadística para la creación de mapas y establecer zonas de anejo (Cueva, 2020).

Los procedimientos geoestadísticos se basan en tres pasos esenciales para desarrollar un análisis, los cuales son: a) realizar análisis exploratorio de datos, b) análisis estructural y c) predicción o interpolación de cada una de las variables sujetas a estudio (Guachamin & Ar, 2019).

Para realizar la modelación de las características que posee el suelo es necesario la utilización de herramientas como GPS para la toma de puntos, georreferenciando el lugar donde fue tomada la muestra de suelo para su

análisis. Los equipos que permiten el traspaso de datos desde y hacia un computador, se pueden mencionar a "Garmin 64 s", "magellan waypoint", "waypoint+", "gps pathfinder office". Con los puntos georreferenciados en GPS y los datos de laboratorio del análisis de suelo se puede proceder a la modelación del mapa de las características del suelo utilizando programas contenido de Sistemas de Información Geográfica tales como: "FarmWorks" que es uno de los más utilizados por los productores, pero la mayoría de investigadores usan software como ArcGIS de ESRI para el procesamiento de imágenes (ESRI, 2016).

Todos estos programas conllevan a una inversión ya que es necesaria la compra de una licencia, pero también existen algunos softwares SIG gratuitos en el mercado que cuentan con todas las herramientas necesarias para la modelación de mapas, entre estos programas se encuentran: GVSIG, software para consultas, diseño y geoprocésamiento, SAGA GIS software para análisis Geo científico Automatizado, GRASS GIS software para datos raster, vectoriales,

Recibido: 18/06/2024

Aceptado: 25/01/2025

**CONTRIBUCIONES DE AUTOR:** **Conceptualización:** de datos: E.Y. Flores, O. Delgado. **Análisis formal:** E.Y. Flores, O. Delgado. **Investigación:** E.Y. Flores, O. Delgado. **Visualización:** E.Y. Flores, O. Delgado. **Redacción-borrador original:** E.Y. Flores, O. Delgado. **Redacción-revisión y edición:** E.Y. Flores, O. Delgado.



Este artículo se encuentra bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial (CC BY-NC 4.0).  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



y QGIS mediante el cual se pueden incorporar “plugings” que permite realizar variedad de procesos con datos vectoriales y raster (Mastergis., 2019).

Conocer la variabilidad espacial del suelo de áreas destinadas a la producción agrícola crea el espacio para establecer sistemas de producción más competentes que permitan el uso adecuado, fraccionado y eficiente de insumos utilizados en la anejo (Cueva, 2020).

En Cuba son escasos los estudios realizados para determinar la variabilidad espacial de las propiedades químicas de los suelos, sin embargo, Rodríguez et al. (2001) demostró que estas son más variables que las físicas, sobre todo cuando los suelos son sometidos a una actividad agrícola intensiva. A partir de la década de los 90, se desarrollaron técnicas novedosas para el levantamiento y mapeo de suelos, basadas en un modelo continuo de variación espacial. También comenzaron a emplearse modelos geo estadísticos que combinados con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), permiten predecir las propiedades de los suelos en lugares no muestreados (Debelis, 2017).

La investigación tuvo como objetivo interpolar variables de fertilidad de suelo mediante Kriging Ordinario para realizar un mapeo temático de un área arrocera de la Empresa Agroindustrial de Granos “Sur del Jíbaro”.

## MATERIALES Y MÉTODOS

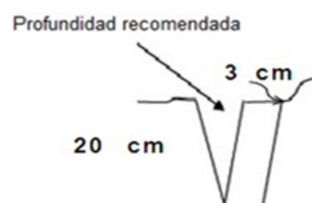
La investigación se realizó en la zona arrocera de la Empresa Agroindustrial de Granos “Sur del Jíbaro” de la provincia Sancti Spíritus, en las coordenadas métricas con longitud 79° 15’ 57” W y latitud 21° 15’ 21” N, y una cota media de 10 msnm. La zona posee una temperatura media anual de 25,5 °C, precipitación promedio de 1215,0 mm y humedad relativa de entre el 75 y

80 %. El suelo es de topografía llana, de textura sobre arcillas masivas y gleyzadas plásticas con drenaje deficiente (Hernández et al., 2015). En la Figura 1 se puede observar una vista en Qgis de la zona de estudio a escala 1:10 000, se representa el área de los lotes 73 y 74 de izquierda a derecha, los cuales poseen un total de 107 ha.

También se observan los 18 puntos estudiados, los cuales aparecen como objetos geoespaciales georreferenciados en el equivalente (EPSG 32617) de coordenadas Universal Transverse de Mercator (UTM).

## Procedimiento de recolección de datos

Para el presente estudio de investigación la población fue representada por 18 muestras. Se utilizaron los siguientes materiales e instrumentos: bolsas de nylon negras de 20 x 30 cm, lápiz, 2 tarjetas para la identificación de las muestras, barrenas tipo holandesa, cuchillo, navegador GPS “Garmin 64 S”, pico y pala. Se procedió del siguiente modo: Haciendo una pequeña excavación en forma de cono con el pico y la pala a una profundidad de 20 cm, por ser ésta la profundidad promedio de los suelos en la zona de estudio, de la parte central de la misma se tomó una rebanada de 3 cm de espesor aproximadamente como se muestra en la Figura 2.



Fuente: NC 36 (2009)

FIGURA 2. Forma de realizar la toma de muestras.

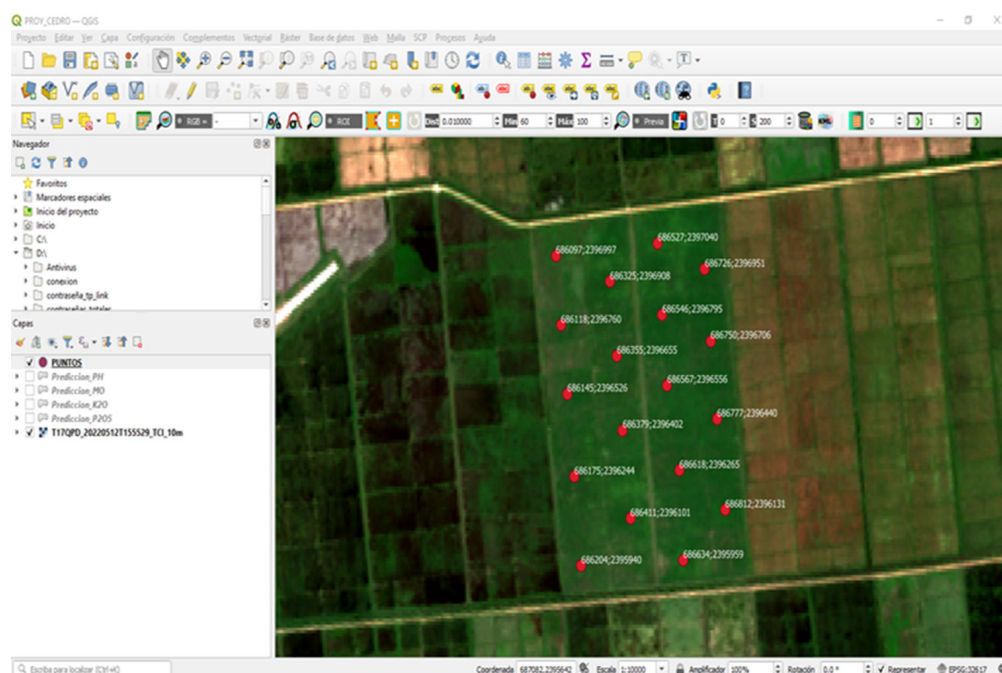


FIGURA 1. Ubicación geográfica de la zona de estudio.

Las muestras se colocaron en bolsas limpias tal y como se especifica en la [NC 36 \(2009\)](#): (Calidad de Suelo. Muestreo), con la particularidad de que una de las tarjetas fue colocada en el interior de las bolsas, mientras la otra fue fijada con hilo a la parte exterior de las mismas para su correcta identificación.

A medida que se iba realizando el muestreo del suelo en forma de Zig-Zag según método internacionalmente aprobado por la [FAO \(2015\)](#) y [NC 36 \(2009\)](#), se determinaron y almacenaron los datos correspondientes a la ubicación exacta de los distintos puntos muestreados utilizando un equipo GPS "Garmin 64 S". Nos aseguramos de que los datos fuesen representativos del área de estudio y que cubrieran un período de tiempo suficiente para poder capturar las variaciones temporales y espaciales de los parámetros. La determinación del PH, el contenido de Fósforo, Potasio y Materia Orgánica de cada una de las muestras, se realizó en el Laboratorio de Análisis Químico de suelos de la provincia Camagüey (UCTB, unidad de ciencia y técnica de base, suelos Camagüey), subordinado al Instituto Nacional de Suelos de Cuba.

#### Análisis de datos

- El análisis exploratorio se llevó a cabo un análisis estadístico básico de los datos utilizando el *software Statgraphics*, con el objetivo de identificar la existencia de valores extremos, la distribución de las variables y la existencia de correlaciones.
- Para la selección del modelo matemático a aplicar en el *Kriging* Ordinario se tuvo en cuenta los variogramas ofrecidos por el *plugin Smart-Map*.
- Los mapas se realizaron desde la pestaña Interpolación del *plugin*
- El proceso de validación fue formalizado desde los gráficos de validación cruzada ofrecidos por *Smart-Map*.

Se establecieron categorías según el método [Oniani et al. \(1973\)](#) que permiten evaluar posteriormente los resultados obtenidos en el muestreo realizado. La misma puede ser consultada en la [Tabla 1](#).

**TABLA 1.** Categorías establecidas para el contenido de fósforo y potasio en el cultivo del arroz

Cat.	Simb.	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg /100 g)	Simb.	KCL (mg /100 g)
Bajo	P1	< 8	K1	< 12
Medio	P2	8 a 15	K2	12 a 18
Alto	P3	>15	K3	>18

Se reflejaron las categorías establecidas para el PH en la [Tabla 2](#).

Los contenidos de materia orgánica presentes en el suelo se clasifican también por categorías, tal y como se representa en la [Tabla 3](#).

**TABLA 2.** Categorías establecidas para el PH en el cultivo del arroz

PH	Categoría
< 4,6	Ácido
4,6-6,0	Ligeramente ácido
6,1- 7,0	Ligeramente neutro

**TABLA 3.** Categorías establecidas para el contenido de MO en el cultivo del arroz.

Categoría	Simbología	Contenido de MO (%)
Muy Bajo	MB	< 1,8
Bajo	B	1,8- 2,4
Medio	M	2,4-3,0
Alto	A	> 3,0

El contenido de materia orgánica en el suelo se clasifica de muy baja cuando la misma existe en un porcentaje inferior a 1,8, baja cuando está en el rango de 1,8 a 2,4 %, media cuando se encuentra entre 2,4-3,0 %, y alta cuando por encima del 3,0 %.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis de laboratorio para los parámetros de suelo se presentan en la [Tabla 4](#).

En la [Tabla 5](#) se presenta un resumen de los resultados señalando además el porcentaje que representa cada clasificación del total de muestras analizadas.

El contenido de MO se muestra durante la investigación con valores para la categoría muy bajo.

#### Análisis exploratorio de datos

Fue realizada una estadística descriptiva para resumir y analizar los datos, lo que incluyó el cálculo de medidas de centralidad y dispersión, así como la identificación de posibles valores atípicos, [Tabla 6](#).

Para PH y MO los valores de asimetría son negativos, con valores menores que (-2), lo cual define que no existe una distribución normal para los datos de estas dos variables; no ocurriendo así para K<sub>2</sub>O y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> dónde la mayoría de los datos se encuentran a la izquierda de la media aritmética y por debajo del valor (+2).

También se pudo observar que para K<sub>2</sub>O y P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> los valores de Curtosis son negativos, indicando así achatamiento de la curva de densidad, y corroborándose con los valores obtenidos para Desviación Típica, los cuales al hacerse mayores elongan la curva ([Figura 3](#)).

Dónde las Curtosis resultaron negativos, es decir platicúrtica, no hay muchos datos entorno a la media, esto es consolidado por las afirmaciones de [Congacha & Jorge \(2015\)](#).

Del análisis estadístico se concluye que debemos ajustar los datos para poder realizar un interpolado con Kriging, para el cual es indispensable una distribución normal de los datos.

**TABLA 4.** Resultados del análisis agroquímico del Laboratorio UCTB, suelos Camagüey

Pto	Campo	Coord. Planas		PH	Cat. pH	P2O5	Cat. Fosf	K2O	Cat. Pot	M.O.	Cat. M.O.
		X	Y								
1	C73	686097	2396997	6,1	LN	10,06	P2	22,2	K3	1,56	MB
2	C73	686325	2396908	6,15	LN	10,3	P2	22,5	K3	1,56	MB
3	C73	686118	2396760	6,06	LN	10,9	P2	21,3	K3	1,56	MB
4	C73	686355	2396655	5,09	LN	6,9	P1	18	K2	1,56	MB
5	C73	686145	2396526	5,88	LN	7,3	P1	19,3	K3	1,56	MB
6	C73	686379	2396402	5,99	LN	7,2	P1	19,5	K3	1,56	MB
7	C73	686175	2396244	6,06	LN	5,22	P1	20,4	K3	1,56	MB
8	C73	686411	2396101	6,01	LN	5,09	P1	19,2	K3	1,56	MB
9	C73	686204	2395940	6,53	LN	4,9	P1	20,2	K3	1,5	MB
10	C74	686634	2395959	6,13	LN	5,1	P1	20,4	K3	1,56	MB
11	C74	686812	2396131	6,18	LN	4,8	P1	19,5	K3	1,68	MB
12	C74	686618	2396265	6,1	LN	5,3	P1	18	K2	1,56	MB
13	C74	686777	2396440	6,07	LN	7,25	P1	18,7	K3	1,56	MB
14	C74	686567	2396556	6,28	LN	7	P1	17,9	K2	1,33	MB
15	C74	686750	2396706	6,36	LN	7,5	P1	18,3	K3	1,33	MB
16	C74	686546	2396795	6,54	LN	7,7	P1	17,6	K2	1,44	MB
17	C74	686726	2396951	6,16	LN	10,43	P2	21,8	K3	1,56	MB
18	C74	686527	2397040	6,44	LN	10,67	P2	21,5	K3	1,56	MB

**TABLA 5.** Clasificación y porcentaje que representan los niveles de nutrientes detectados en el suelo de la muestra total

Parámetro	Cant. de Muestras	Clasificación	%
PH	18	Ligeramente Neutro	100
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	5	P1	28,8
		P2	72,2
K <sub>2</sub> O	14	K2	77,78
		K3	22,22

**TABLA 6.** Estadígrafos para las propiedades de suelos analizadas

ESTADÍGRAFOS	PH	MO	K2O	P2O5
Media	6,118	1,531	19,794	7,423
Mediana	6,115	1,56	19,5	7,225
Varianza	0,099	0,0072	2,485	4,763
Desv. Típica	0,315	0,085	1,576	2,182
Mínimo	5,09	1,33	17,6	4,8
Máximo	6,54	1,68	22,5	10,9
Rango	1,45	0,35	4,9	6,1
Asimetría	-3,30858	-2,4978	0,489243	0,724444
Curtois	5,62041	2,18387	-1,00623	-1,06049
Coef. Variación	5,16%	5,56%	7,96%	29,40%

### Selección del modelo de Kriging

El modelo usado para la interpolación fue un modelo isotrópico, es decir la variación estuvo dada básicamente por la distancia de las muestras Nielsen et al. (1993), citado por Valle et al. (2014), que a medida que la distancia aumenta, también lo hace la semivarianza (Figura 4).

Los variogramas de ambas variables presentan meseta o *sill* (semivarianza máxima) finito, hasta allí hay correlación espacial. Según Webster & Oliver (2007) la falta de *sill* indica tendencia en la estructura espacial o la falta de

estacionariedad de segundo orden. Los valores bajos de *nugget* indican que el intervalo de muestreo es adecuado para reflejar la varianza (Nielsen et al., 1993).

En particular, en el proceso de selección de modelo para el Kriging ordinario, la elección del modelo de variograma es crucial. El modelo esférico es apropiado para datos con una correlación espacial corta. Por otro lado, el modelo exponencial es utilizado para datos con una correlación espacial moderada, el modelo gaussiano se utiliza para datos con una correlación espacial larga.

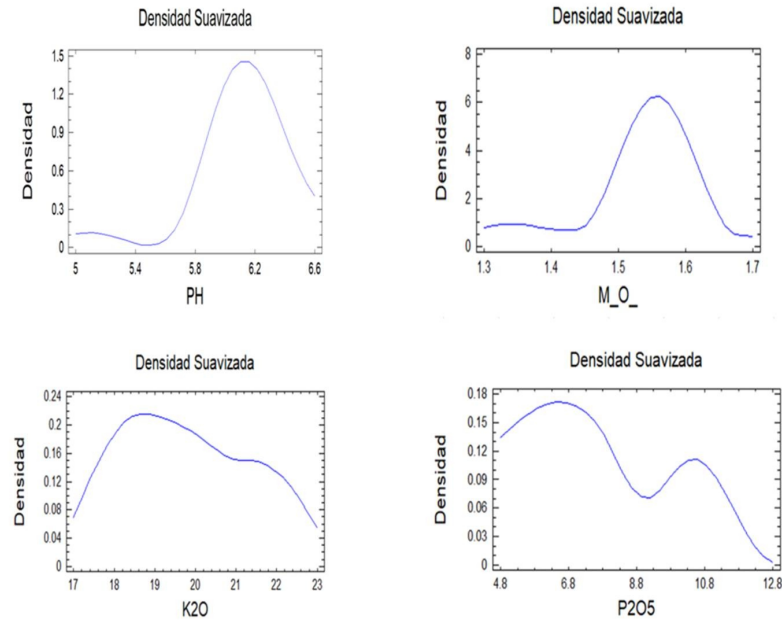
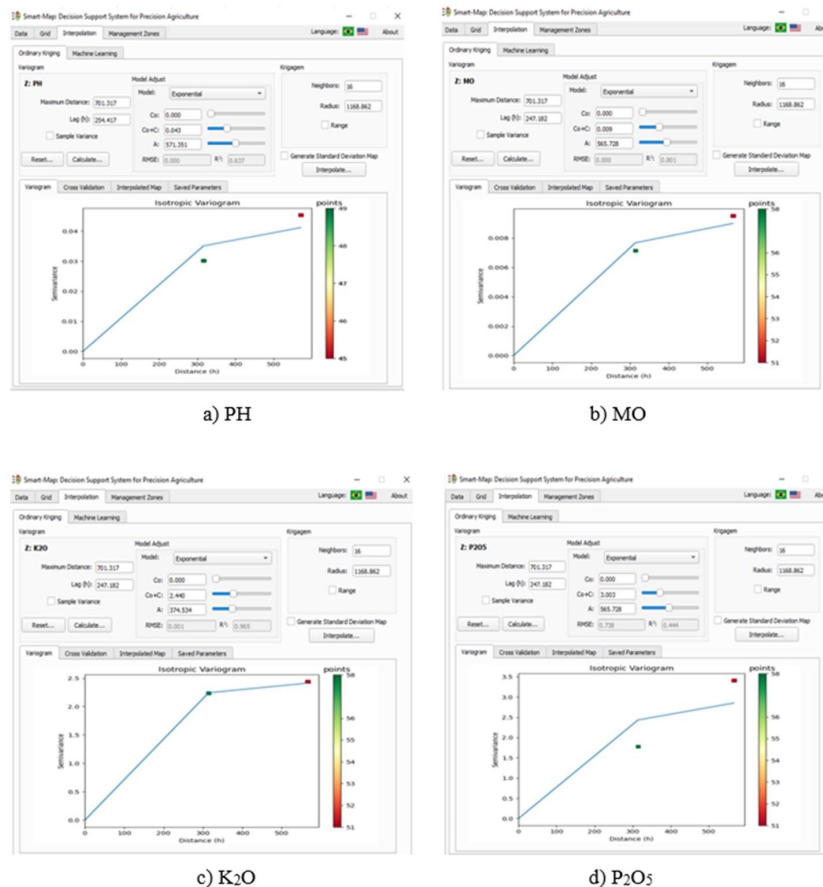


FIGURA 3. Curvas de densidad para los datos de las muestras en las variables de suelo estudiadas a) PH; b) MO; c) K<sub>2</sub>O; d) P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>



\*Valores geoestadísticos más importantes:

M: modelo - A: amplitud o range - C1: Varianza explicada - C0: Efecto Nugget o ruido -  $C0+C1$ : Sill o umbral -  $C0/(C0+C1)*100$ : porcentaje de varianza estructural - RMSE: error cuadrático medio estandarizado- R<sup>2</sup>: Correlación.

FIGURA 4. Variogramas isotrópicos que muestran el recorrido de la curva ajustada por el plugin Smart-Map y todos los valores geoestadísticos por defecto. a) PH; b) MO; c) K<sub>2</sub>O.



El modelo que más se ajustó para todos los casos estudiados fue el exponencial, dónde tiende a alcanzarse mesetas altas con ligera tendencia, *nugget* con valor cero lo cual indica que el muestreo fue adecuado, sin error instrumental y un rango alto bien definido en la ventana del plugin (A), la correlación entre las muestras a un valor de A rango desaparece.

### Interpolación mediante kriging ordinario

El siguiente paso es realizar la interpolación utilizando el modelo de Kriging seleccionado. Kriging es un método general con diferentes variantes dependiendo de la información que se tenga, el tipo de variable, y la cantidad y tipos de variables a considerar. A manera más general también puede incorporar información temporal, por lo que se puede determinar y modelar la variación espacio-temporal de la variable o variables.

Es más recomendado usar Kriging cuando los datos están normalmente distribuidos, se tiene una buena cantidad de observaciones (depende pero 30, 40 o más es lo recomendado), son estacionarios (la media y varianza de la variable no varían significativamente, esto puede subsanarse con diferentes variantes), y hay una dependencia espacial de la variable (variograma muestra un incremento de la semivarianza con la distancia) (Chiles & Delfiner, 2012; Goovaerts, 1997; Isaaks & Srivastava, 1989; Webster & Oliver, 2007).

### Comportamiento del PH

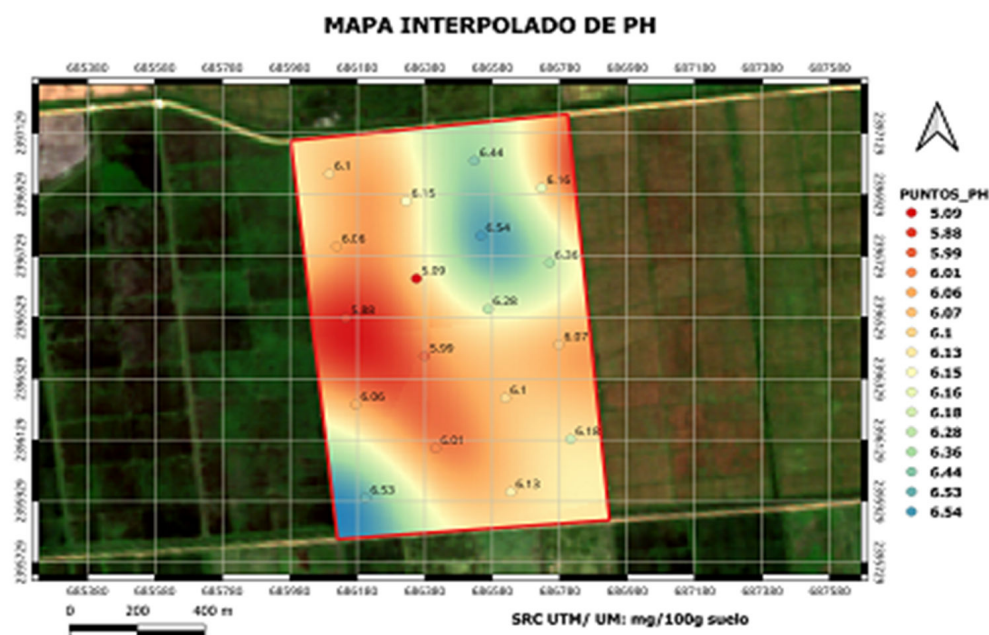
El PH es una de las variables más importantes en los suelos agrícolas, pues afecta directamente a la absorción de los nutrientes del suelo por las plantas, así como a la resolución de muchos procesos químicos que en él se

producen. De 18 muestras se clasificaron como ligeramente neutras, representan el 100 % de las hectáreas en estudio pues sus valores se ubicaron entre 6,0 y 6,8 %. Uno de los factores que inciden en este resultado es el efecto que causa la inundación del suelo, ya que ésta incrementa el PH en suelos ácidos y lo reduce en suelos básicos.

En la zona de estudio los suelos se caracterizaron por presentar un horizonte B síalítico y al igual que los Fersialíticos los cuales son medianamente profundos, formados sobre caliza suave y en el horizonte A son de color pardo a pardo oscuro, arcillosos y muy plásticos. La superficie con estructura del suelo no es fina, más bien prismática, posiblemente por influencia del cultivo del arroz además tienen un PH entre 6-7 lo cual está reflejado en las clasificaciones de Survey Staff. L. (2010).

La experiencia acumulada indica que en la mayoría de los suelos arroceros el PH llega a alcanzar valores entre 6,5 y 7,2, aproximadamente un mes posterior a su inundación, manteniéndose el mismo a ese nivel hasta que secan, haciendo que estos valores dependen del momento de muestreo. Según datos del Instituto de Suelos de Cuba, el 51 % del área total de suelos ácidos está erosionado, lo cual es una evidencia de la incidencia del factor que se analiza (Aguilar et al., 2016). La inundación trae aparejado una disminución ligera del PH durante los primeros días, luego aumenta paulatinamente hasta alcanzar valores estables cercanos a la neutralidad en pocas semanas, siendo mayor en los suelos ácidos y menor en los alcalinos (Figura 5).

La variabilidad de PH estuvo representada en forma por polígonos con bordes suaves, la distribución espacial de los suelos ligeramente ácidos marcados en amarillo, los cuales componen 10,67 ha, mientras el resto ligeramente neutros. Los que se representan en forma de polígonos en rojo y verde-azul conforman 94,3 ha. Otros autores



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 5. Variabilidad espacial del contenido de PH.

como [Hernández et al. \(2019\)](#) han demostrado que los suelos del Agrupamiento Pardo Sialítico, que son los más extensivos de Cuba (3 355,800 ha; 21 % del territorio) y muy susceptibles a la erosión, no se acidifican por el proceso erosivo, sino por el contrario, aumenta el PH con la profundidad. Las deducciones permiten plantear que, *Kriging* ordinario es un método geoestadístico robusto, utilizado para variables simples estacionarias como el PH y CE.

### Comportamiento de la Materia Orgánica

Se clasificaron las muestras analizadas como correspondientes a suelos con muy bajo contenido de materia orgánica, pues como se puede observar en la [figura 6](#), los análisis realizados presentan valores por debajo de 1,8 %; para esta variable se encuentra enmarcada un área de 45, 29 ha de más alto contenido y el de menos con 61, 13 ha, lo cual puede ser motivo de un arrastre causado por las aguas desde este a oeste en las capas superficiales de los lotes arroceros. De igual forma puede influir que son suelos poco humificados con una fuerte gleyzación y presencia de arcilla montmorillonita, con un mal drenaje superficial e infiltración muy lenta.

En esta variable se observan en los resultados obtenidos en la interpolación, dos polígonos orientados de norte a sur con bordes bien definidos y casi de igual tamaño, indicando así en la interpolación homogeneidad en las características del terreno y respaldado por la idea de que en terrenos llanos varían de forma suave, no así en zonas abruptas.

Referente al tema [Caballero et al. \(1999, 2012\)](#) plantearon que los residuos orgánicos al ser aplicados al suelo, mejoran sus propiedades físicas, químicas y biológicas y favorecen la fertilidad del mismo.

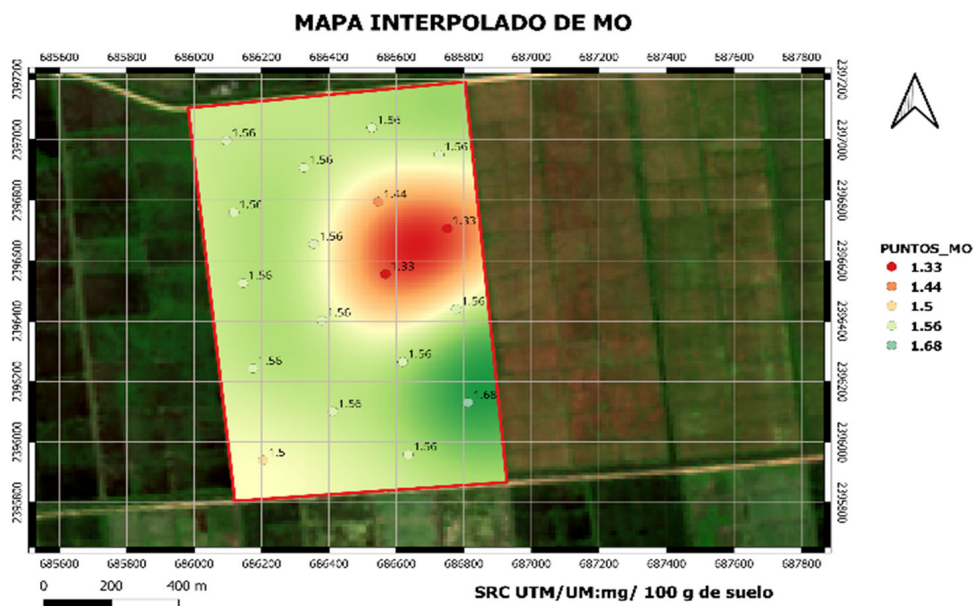
### Comportamiento del Potasio

En las muestras analizadas, solo dos revelaron contenido de Potasio inferior a 12 mg/100 gramos de suelo representando un 77,78 %, por lo que según el método de [Dobermann & Fairhurst \(2000\)](#) se clasificaron como K1, y representan un bajo nivel. En cuatro muestras, para un 22,22 %, se detectaron valores entre 12 y 18 mg/100 g de suelo, por lo que se clasifican como K2; lo que significa, que, existe una tendencia de contenido medio a baja para este nutriente en las muestras evaluadas.

El comportamiento de la distribución espacial del potasio en las parcelas analizadas con ayuda del software Qgis evidencia zonas marcadas en rojo donde su contenido es bajo, marcadas en amarillo donde su contenido es medio y localidades de color verde para contenido alto. Pero tal y como ocurre en los casos anteriores, las señala en patrones geométricos que no se corresponden con la realidad realizada por otros medios convencionales ([Figura 7](#)).

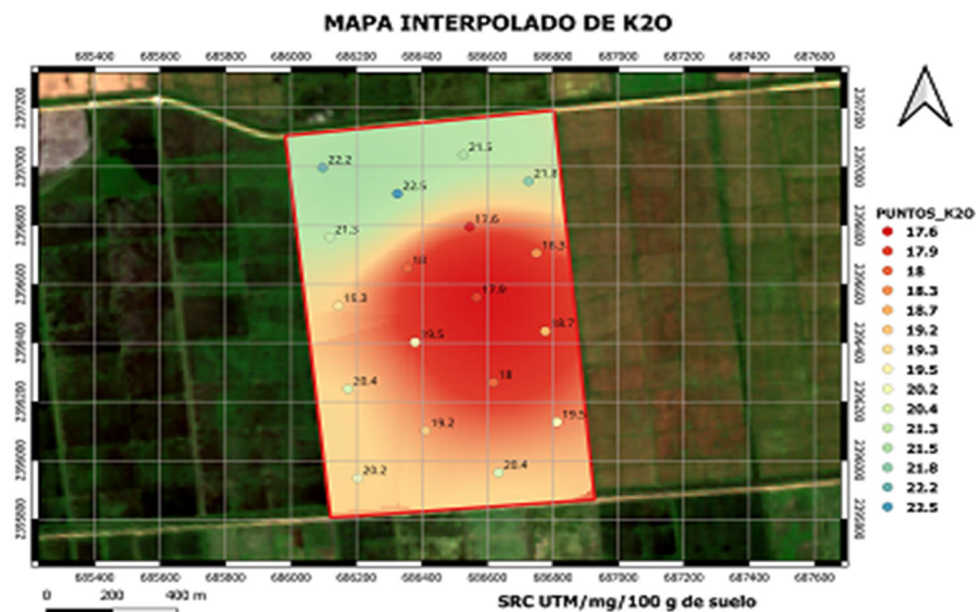
Lo anterior muestra en ese mismo orden, que existen 40,37 ha del nivel rojo, 55,19 ha del nivel amarillo o medio y 11,09 ha para el nivel alto en el mapa temático. Al encontrar estas diferencias podemos acertar que una fertilización a iguales niveles no puede ser eficiente, ni económica.

Es de recordar que el  $K_2O$  es importante en la descomposición de carbohidratos, un proceso que provee de energía a la planta. Es esencial en la actividad de las enzimas, este también actúa en la apertura y cierre de las estomas, además contribuye en la planta a resistir los ataques de enfermedades. El potasio juega un importante papel sobre los factores que determinan la resistencia al vuelco, esta resistencia es tanto más elevada cuanto mayor son las aportaciones de este elemento. Otros autores como [Oniani et al. \(1973\)](#), plantearon que los primeros síntomas



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 6. Variabilidad espacial del contenido de la materia orgánica.



Fuente: Elaboración propia.

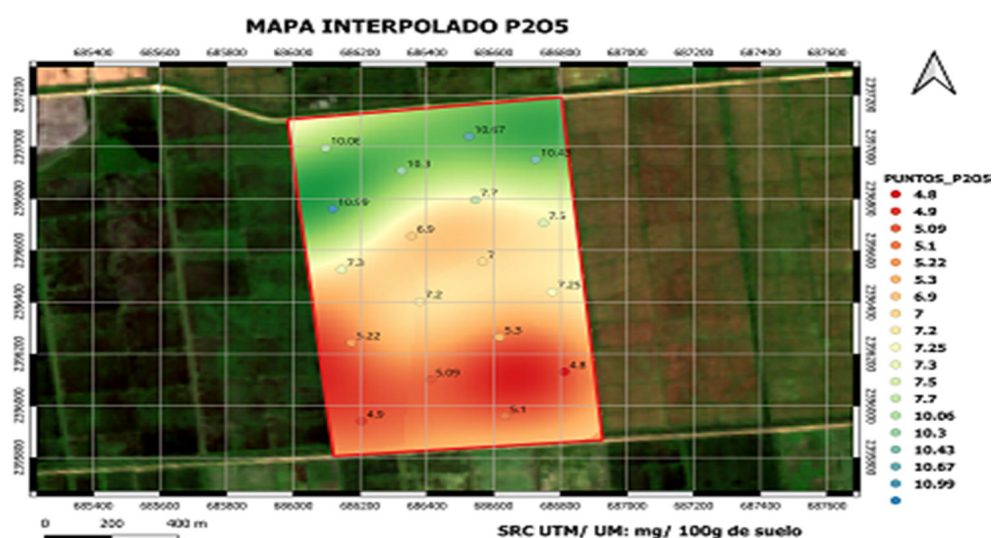
FIGURA 7. Variabilidad espacial del contenido de potasio.

de la deficiencia aparecen como plantas de color verde oscuro que tienen hojas con los márgenes de color café amarillento o parduzco o manchas necróticas de color café oscuro en la punta de las hojas viejas; las hojas superiores son cortas, agobiadas y de un color verde oscuro sucio; las puntas y los márgenes de las hojas se pueden secar.

### Comportamiento del fósforo

De las 18 muestras evaluadas, para 13 de ellas el contenido de fósforo se encontraron con valores inferiores a 8 mg/100 g de suelo clasificándose los mismos tipo P1, constituyendo un 77,78 % del área en estudio (figura 8).

En las restantes cinco muestras, que representan el 27,8 % del área el contenido de fósforo se encuentra en una proporción entre 8,9 a 11,4 mg/100 g de suelo, por lo que se clasifican como P2. Esto demuestra que la zona presenta bajos niveles de fósforo. El fósforo (P) es un componente esencial de muchos procesos fisiológicos en las plantas. El manejo del P en el suelo requiere una estrategia a largo plazo para mantener el suministro de P disponible para las plantas a un nivel apropiado debido a su relativa estabilidad dentro de los suelos. Aunque se plantea, que las plantas no utilizan todo el P que se aplica como de P residual que puede acumularse por las aplicaciones continuas de fertilizante.



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 8. Variabilidad espacial del contenido de fósforo.



Tal y como ocurre en el caso del PH, el procesamiento de la información para conocer la variabilidad espacial del  $P_2O_5$  en los suelos analizados con ayuda del *software* SIG permite conocer de manera general, dónde su contenido es bajo (marcado en rojo y amarillo), lo cual comprende 71,5 ha de las 107,03 ha del área de estudio y dónde su contenido es medio en verde, esto significan 35,58 ha. Los métodos de interpolación proporcionan objetivamente la distribución espacial de los fertilizantes por parcelas.

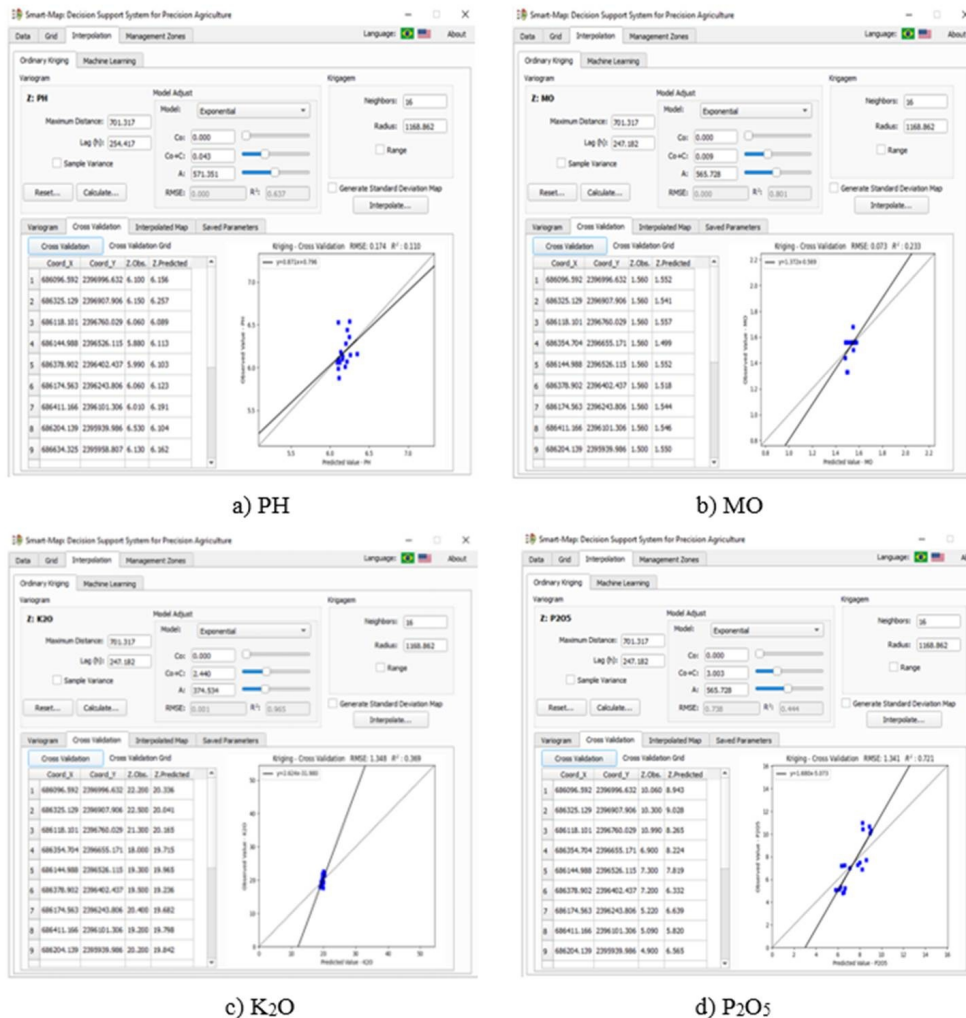
### Validación y verificación del modelo de Kriging Ordinario

Se ha elegido una distribución de datos de tipo exponencial y una distancia máxima de 700 metros para observar la correlación espacial de los datos muestreados; los modelos explican la variabilidad entre las muestras, porque las líneas se asemejan a la distribución de los puntos a lo largo de los ejes X; los valores de *nugget*, *sill* y rango se pueden extraer de la Figura 9.

Cada modelo se comprobó por medio de la validación cruzada, este fue un proceso iterativo en donde se fue variando distintos parámetros hasta conseguir el mínimo error. Como se puede observar en la Figura 9, en todos los cuadros de los errores de predicción, la media estandarizada es casi cero y el error cuadrático medio estandarizado (RMSE) está próximo a uno. Estos valores aseguran una buena predicción.

Debido a que la media está en función de la escala de los datos se optó por utilizar la media estandarizada, y el error cuadrático medio estandarizado para valorar el modelo que proporciona las mejores predicciones.

El ajuste lineal en los gráficos de PH, MO,  $K_2O$  y  $P_2O_5$  muestran valores de  $R^2$ , el cual es igual a 0,110 para PH, 0,233 para MO, 0,369 en  $K_2O$  y  $P_2O_5$  con 0,721 evidenciando la dependencia espacial; para el primer caso es relación positiva débil, positiva media en MO y  $K_2O$ , además positiva considerable en  $P_2O_5$ ; lo cual



\*Valores geostatísticos más importantes:

M: modelo - A: amplitud o range - C1: Varianza explicada - C0: Efecto Nugget o ruido - C0+C1: Sill o umbral -  $C0/(C0+C1)*100$ : porcentaje de varianza estructural - RMSE: error cuadrático medio estandarizado -  $R^2$ : Correlación

FIGURA 9. Relación entre los valores reales y los valores estimados utilizando validación cruzada para a) PH; b) MO; c)  $K_2O$ ; d)  $P_2O_5$ .

indica que para el caso  $P_2O_5$  se logró un mayor ajuste de probabilidad normal. Los valores de RMSE se comportaron de la siguiente forma para PH, MO,  $K_2O$  y  $P_2O_5$ ; 0,174; 0,073; 1,348; 1,341, respectivamente, todos cercanos a el valor uno; los cuales aseguran una buena predicción.

Como se mencionó anteriormente, las métricas son más útiles cuando se comparan modelos, pero para este caso, usando solo el modelo exponencial, se puede decir que presentan valores aceptables: la RMSE está cerca de 1, la correlación (r) es positiva para todos los casos, el RMSE es menor a la desviación estándar siempre. Conforme American Psychological Association (2010), valores que no pueden por definición ser superiores a 1 o inferiores a -1 (r,  $R^2$ ) se reportan.

## CONCLUSIONES

- Los variogramas en estadística espacial contribuyen al análisis del comportamiento de una variable en un área determinada, cuyos resultados reflejan un variograma experimental en el que se expresa la distancia máxima y la forma en que los datos o puntos influyen sobre otro dato de la información.
- El proceso presentado para la modelación del variograma experimental es crucial en la descripción de la estimación por definición matemática, ya que afectaría al valor de Kriging debido a que este procedimiento requiere de valores numéricos precisos no solo para la distancia entre puntos sino también entre el punto intersecado por interpolación.
- Además, al comparar todos los modelos se concluye que el modelo más apropiado en nuestro estudio es el modelo exponencial porque presentó un Error Cuadrático Medio (RMSE) para PH, MO,  $K_2O$  y  $P_2O_5$ ; de la siguiente forma 0,174; 0,073; 1,348; 1,341, respectivamente, todos cercanos a el valor uno, lo cuales asegura una buena predicción; y un nivel de correlación ( $R^2$ ) con valor de 0,110 para PH, 0,233 para MO, 0,369 en  $K_2O$  y  $P_2O_5$  con 0,721 evidenciando la dependencia espacial existente.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, Y., Castellanos, A., & Riverol, M. (2016). Manejo ecológico del suelo. En *Avances de la Agroecología en Cuba* (Funes, F. y LL Vázquez. Avances de la Agroecología en Cuba, pp. 77-105). [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/55378/Documento\\_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/55378/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- APA-American Psychological Association. (2010). *Publication Manual of the American Psychological Association* (6.ª ed.) (6.ª ed). American Psychological Association, Washington, D.C, USA. [https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci\\_nlinks&pid=S0256-7024202200020002900001&lng=en](https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_nlinks&pid=S0256-7024202200020002900001&lng=en)
- Caballero, R., Gandarilla, J. E., Pérez, D., & Rodríguez, D. (2012). Efecto de los abonos orgánicos en la explotación intensiva de los huertos. *Centro Agrícola*, 39(1), 69-73.
- Caballero, R., Gandarilla, J., Pérez, D., & Alonso, R. (1999). Efecto de los abonos orgánicos en la explotación de huertos intensivos. *Universidad de Camaguey. Instituto de suelos. Cuba*.
- Chiles, J.-P., & Delfiner, P. (2012). *Geostatistics: Modeling spatial uncertainty* (Vol. 713). John Wiley & Sons. <https://www.researchgate.net/publication/257619803>
- Congacha, J., & Jorge, W. (2015). *Estadística aplicada a la educación con actividades de aprendizaje*. Editorial Académica Española (EAE), España. <http://cimogsys.esPOCH.edu.ec/direccion-publicaciones/public/docs/books/2019-09-18-161118-estad%C3%ADstica%20aplicada%20a%20la%20educaci%C3%B3n%20con%20actividades%20de%20aprendizaje.pdf>
- Cueva, R. E. I. (2020). *Análisis geoestadístico y multivariado de atributos físicos de un suelo en cultivo de banano finca Márquez la Peaña cantón Pasaje* [Tesis, UTMACH, Unidad Académica de Ciencias Agropecuarias, Machala, Ecuador]. <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/15537>
- Debelis, S. P. (2017). *La variabilidad espacial en tierras hidrohalomórficas* [Tesis (en opción al título de Máster en Ciencias Agropecuarias), Universidad Nacional de Córdoba, Argentina]. <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/4829>.
- Dobermann, A., & Fairhurst, T. (2000). *Arroz: Desórdenes nutricionales y manejo de nutrientes*. International Rice Research Institute-Instituto de la potasa y fósforo, Trad. J Espinosa. IPNI. (1ra ed.). Quito, Ecuador. Disponible en: <https://catalogo.ug.edu.ec/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=86213>
- ESRI. (2016). *Comparar métodos de interpolación*. ArcMap, Conceptos del conjunto de herramientas de Interpolación. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/geostatistical-analyst/an-overview-of-the-interpolation-toolset.htm>
- FAO. (2015). *Suelos y biodiversidad*. FAO. <https://www.fao.org/documents/card/en?details=59b5336f-0ae7-46c4-8d72-2fe2748723cb>
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation* (Vol. 483). Oxford University Press. <https://www.researchgate.net/publication/224839861>
- Guachamin, Y., & Ar, J. W. (2019). *Estudio de variabilidad espacial de propiedades químicas del suelo mediante procedimientos geoestadísticos en la comunidad "Larcapamba* [Tesis, Universidad Central del Ecuador-Quito]. <https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/76d2a08d-1c90-4348-88b5-710469367c60>
- Hernández, J. A., Pérez, J. J. M., Bosch, I. D., & Speck, N. C. (2019). La clasificación de suelos de Cuba: Énfasis en la versión de 2015. *Cultivos Tropicales*, 40(1), ISSN: 0258-5936, Publisher: Ediciones INCA.

- Hernández, J., Pérez, J., Bosch, I., & Castro, S. (2015). *Clasificación de los suelos de Cuba 2015*. INCA, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0258-59362019000100015](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362019000100015)
- Isaaks, E. H., & Srivastava, R. M. (1989). *Applied geostatistics*. Oxford University Press, New York, USA. [https://books.google.com.cu/books/about/Applied\\_Geostatistics.html?id=vC2dcXFLI3YC&redir\\_esc=y](https://books.google.com.cu/books/about/Applied_Geostatistics.html?id=vC2dcXFLI3YC&redir_esc=y)
- Mastergis. (2019). *7 Softwares GIS Libres que debes conocer-MasterGIS* [Software]. <https://mappinggis.com/2023/07/renovamos-el-master-gis-online-con-software-libre/>
- NC 36: 2009. (2009). *Calidad de Suelos. Muestreo* (p. 11). Oficina Nacional de Normalización (ONN), La Habana, Cuba.
- Nielsen, D. R., Tillotson, P. M., & Vieira, S. R. (1993). Analysing field measured soil water properties. *Water Manag.*, 6, 93-109.
- Oniani, O., Chater, M., & Mattingly, G. (1973). Some effects of fertilizers and farmyard manure on the organic phosphorus in soils. *Journal of soil science*, 24(1), 1-9, ISSN: 0022-4588, Publisher: Wiley Online Library.
- Rodríguez, J., Pinochet, D., & Matus, F. (2001). *Fertilización de los cultivos*. Editorial Lom, Santiago de Chile, Chile.
- Survey Staff. L. (2010). *Claves para la Taxonomía de Suelos* (Departamento de Agricultura de Estados Unidos. Servicio de Conservación de Recursos Naturales". Undécima Edición. Versión en español). Departamento de Agricultura de Estados Unidos. <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Spanish-Keys-to-Soil-Taxonomy.pdf>.
- Valle, S., Carrasco, J., Pinochet, D., & MacDonald, R. (2014). Variabilidad espacial y temporal de la disponibilidad de nutrientes y la condición de acidez de suelos volcánicos. *Agro sur*, 42(3), 15-22, ISSN: 0719-4196.
- Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). *Geostatistics for Environmental Scientists* (2.<sup>a</sup> ed.) (2.<sup>a</sup> ed.). West Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons. <https://www.wiley.com/en-us/Geostatistics+for+Environmental+Scientists%2C+2nd+Edition-p-9780470028582>

Eldo Yoel Flores-del Castillo. Profesor Asistente. MSc., Universidad de Sancti Spiritus "José Martí Pérez". Ave. de los Mártires # 360, Sancti Spiritus, Cuba.

Oswaldo Delgado-González. PhD Estudiante Universidad Tecnológica Metropolitana de Chile. E-mail: [osvaldo2.delgado.gonzalez@gmail.com](mailto:osvaldo2.delgado.gonzalez@gmail.com)

La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.