

Análisis de variación espacial de la fertilidad del suelo para la delimitación de zonas de manejo homogéneo en agricultura de precisión

Analysis of spatial variation in soil fertility for the delimitation of homogeneous management zones in precision agriculture

Galindo-Pacheco, Julio¹; Vargas-Díaz, Ruy^{1*}; Martínez-Niño, Carlos²; Franco-Florez, Clara¹

¹Centro de Investigación Tibaitatá, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Cundinamarca, Colombia

²Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Recibido: 09/10/2024 | Aceptado: 01/12/2024 | Publicado: 17/12/2024

Correspondencia*: rvargas@agrosavia.co

RESUMEN

Este estudio analizó la variabilidad espacial de la fertilidad del suelo en una parcela de 1440 m² en Mosquera, Colombia, para crear zonas de manejo homogéneas para la agricultura de precisión. Se recolectaron 480 muestras de suelo usando una cuadrícula de 3x1 m, analizando pH, conductividad eléctrica, fósforo, cationes intercambiables, microelementos y materia orgánica del suelo (MOS). El análisis de componentes principales (PCA) identificó la MOS, el pH y la conductividad eléctrica como indicadores clave para la zonificación. La interpolación Kriging mapeó estas propiedades, revelando una alta variabilidad. El modelo exponencial se ajustó mejor a los semivariogramas. El clustering difuso, basado en los umbrales de los indicadores, dividió la parcela en dos zonas, con una alta superposición entre las divisiones basadas en pH y MOS. Un modelo QUEFTS simuló el rendimiento de los cultivos, mostrando que la fertilización optimizada de N y K, basada en la zonificación, maximizó los rendimientos. El estudio demuestra la efectividad del uso de PCA y Kriging para crear zonas de manejo. La zonificación basada en MOS mejoró el manejo de la fertilización P y K, mientras que la zonificación basada en pH se enfocó en las diferencias de micronutrientes. Los resultados destacan el potencial de la agricultura de precisión para mejorar los rendimientos de los cultivos y la eficiencia de los recursos. Investigaciones futuras deberían incorporar las propiedades físicas del suelo y las variaciones climáticas para un manejo de zonas más completo.

Palabras clave: Agricultura de precisión; análisis de componentes principales; fertilidad del suelo; kriging, variabilidad espacial; variograma; zonas de manejo homogéneo

ABSTRACT

This study analyzed spatial soil fertility variability in a 1440 m² plot in Mosquera, Colombia, to create homogeneous management zones for precision agriculture. 480 soil samples were collected using a 3x1 m grid, analyzing pH, electrical conductivity, phosphorus, exchangeable cations, microelements, and soil organic matter (SOM). Principal Component Analysis (PCA) identified SOM, pH, and electrical conductivity as key indicators for zoning. Kriging interpolation mapped these properties, revealing high variability. The exponential model best represented the semivariograms. Fuzzy clustering, based on indicator thresholds, divided the plot into two zones, with high overlap between pH and SOM-based divisions. A QUEFTS model simulated crop yield, showing that optimized N and K fertilization, based on zoning, maximized yields. The study demonstrates the effectiveness of using PCA and Kriging to create management zones. SOM-based zoning improved P and K fertilization management, while pH-based zoning targeted micronutrient differences. The results highlight the potential of precision agriculture to improve crop yields and resource efficiency. Future research should incorporate physical soil properties and climatic variations for more comprehensive zone management.

Keywords: Precision agriculture; principal component analysis; soil fertility; kriging, spatial variability; variogram; homogeneous management zones

Cómo citar este artículo: Galindo-Pacheco, J., Vargas-Díaz, R., Martínez-Niño, C. & Franco-Florez, C. (2024). Análisis de variación espacial de la fertilidad del suelo para la delimitación de zonas de manejo homogéneo en agricultura de precisión. *Revista Científica Dékamu Agropec*, 5(2), 74-86. <https://doi.org/10.55996/dekamuagropec.v5i2.289>

1. INTRODUCCIÓN

La variabilidad de la fertilidad química y, en general, de las propiedades de los suelos agrícolas es una característica extendida a nivel mundial. Esta variabilidad afecta los lotes comerciales y muchas veces no es considerada en el momento de realizar los planes de fertilización (Salem et al., 2024). Pero la aplicación uniforme de nutrientes a lo largo de un campo con alta heterogeneidad no puede ser eficiente ni efectiva para obtener buenos rendimientos en los cultivos (Liu et al., 2021). Además, tendrá un impacto negativo en las condiciones del suelo que a la larga pondrá en riesgo la sostenibilidad del sistema productivo.

Las causas de la heterogeneidad del suelo son tanto naturales como antrópicas. El manejo intensivo de plantaciones y la diversidad de especies cultivadas puede favorecer diferentes grados la degradación de suelos, fomentar la acumulación de algunos nutrientes y crear serios desbalances nutricionales (L. Bai et al., 2022). Un manejo ineficiente del riego puede ser causante de la variabilidad en los atributos del suelo (Yang et al., 2023). Los mismos residuos vegetales de cultivos son causa de heterogeneidad del suelo vía la actividad microbiana (D'Acunto et al., 2024). También pueden ocurrir fenómenos naturales que causan heterogeneidad en el suelo, como son los terremotos que remueven aguas salinas de la profundidad hacia la superficie (Tokumoto et al., 2023). La topografía del terreno también favorecerá la heterogeneidad del suelo, en especial, las concentraciones de nitrógeno disponible para los cultivos (Yao Wang et al., 2022).

La heterogeneidad en las propiedades del suelo puede analizarse químicamente por nutriente, pero también con las propiedades fisicoquímicas como la reacción del suelo o pH, la concentración de materia orgánica y la conductividad eléctrica, que afectan la disponibilidad de varios nutrientes a la vez y tienen un impacto significativo en el rendimiento de los cultivos (Ameer et al., 2022; Ramzan et al., 2021). La materia orgánica del suelo puede promover la actividad biológica que favorece las propiedades físicas y químicas asociadas con la fertilidad, el pH del suelo afecta la disponibilidad de los elementos nutricionales en el suelo, y la conductividad eléctrica determina las especies cultivables.

La concentración de la materia orgánica del suelo (MOS) ha sido utilizada como indicadora de la calidad del suelo, por sí sola puede explicar la heterogeneidad espacial del rendimiento de los cultivos en respuesta a la variabilidad climática y también contribuye eficazmente a reducir los efectos negativos del calentamiento global (Deng et al., 2023). Con la evaluación espacial de la MOS se puede realizar una zonificación del suelo para relacionarla con los cultivos presentes y facilitar su detección remota (G. Wang et al., 2024).

La conductividad eléctrica del suelo puede ser una fuente de heterogeneidad en el terreno que explica la aparición de parches en los cultivos (Chen & Liu, 2024). En algunos suelos la CE puede ser el factor que presenta mayor heterogeneidad con respecto a la MOS o al pH (Yadav et al., 2022).

Todas estas propiedades pueden variar e interactuar de modo que su acción no es fácil de dilucidar por separado. Entender dichas relaciones ayudará a hacer un manejo adecuado del suelo para favorecer la productividad de los cultivos y la sostenibilidad del ecosistema. Por ejemplo, el contenido de la materia orgánica del suelo (MOS) puede variar con factores como el pH, temperatura, precipitación, altura sobre el nivel del mar y rotación de cultivos (Jing et al., 2024).

También es conveniente examinar las relaciones entre los nutrientes y utilizar modelos que permitan predecir el comportamiento del suelo y los cultivos en zonas no muestreadas con el fin de reducir los costos que implica el detalle en tiempo y espacio de los análisis de laboratorio (Haroon et al., 2023). Para estudiar la heterogeneidad del suelo se han empleado métodos geoestadísticos, que permiten crear mapas de distribución espacial de las propiedades del suelo. Los métodos de autocorrelación tales como el índice de Geary y la I de Moran, a manera de ejemplos, permiten

establecer patrones espaciales de las variables medioambientales y facilitan la interpolación de datos a áreas no muestreadas.

En muchos casos se prefiere que el muestreo de las propiedades del suelo se haga de manera sistemática, siguiendo los puntos de una grilla a un espaciamiento dado. Este espacio o tamaño de grilla puede ser determinante. Para la evaluación de una pradera de pastos, se utilizó el muestreo utilizando una grilla de 25mx25m, con lo cual se pudo observar la autocorrelación de las concentraciones de sulfatos. Pero si la muestra se toma cada 100m, como se acostumbra comercialmente, estas variaciones que generan la autocorrelación no son evidentes (McCormick et al., 2009). Una alternativa es el uso del barrido por inducción electromagnética del suelo (EMI) para caracterizar la variación espacial de sus propiedades suelo, pero su interpretación requiere una capacitación adecuada.

El resultado final del estudio de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo conduce a la creación de zonas de manejo homogéneo, que pueden ser construidas de manera técnica con ayuda de algunos análisis, como lo es el cluster. Bai et al. (2023) delinearon zonas de manejo homogéneo de la salinidad del suelo con base en la conductividad eléctrica (CE) complementada con información de suelo (contenidos de arena, limo y arcilla), y vegetación (como, por ejemplo, el NDVI), ya que con sólo la CE la variabilidad era muy grande y la zonificación demasiado fragmentada, por lo que resultaba impráctica.

Aunque los métodos de percepción remota pueden contribuir a la zonificación y el manejo de cultivos, utilizando algunos índices espectrales como el NDVI, sigue siendo necesaria la evaluación en el terreno de propiedades clave del suelo que pueden afectar los cultivos en rotación según los diferentes planes de fertilización para las especies cultivadas (Pizarro et al., 2023). En este artículo se evalúan en detalle las propiedades de fertilidad química de un suelo agrícola para determinar zonas de manejo homogéneo en el cultivo de hortalizas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En un lote experimental en el municipio de Mosquera, departamento de Cundinamarca - Colombia, un área de 1,440 m², de forma rectangular (60 x 24 m), en la cual se creó una subdivisión imaginaria con una grilla de 3x1 m, es decir, 3 m de largo y 1 m de ancho en forma rectangular. En cada punto de intersección de la malla así conformada, se tomó una muestra de suelo en el perfil hasta una profundidad de 30 cm, para un peso total de 1 kg, que se llevó debidamente empacado y rotulada para su análisis de fertilidad en el laboratorio de química analítica de suelos de Agrosavia. En total se analizaron 480 puntos.

Se determinaron las propiedades químicas del suelo en cada punto de la siguiente manera: pH por el método potenciométrico, conductividad eléctrica en relación 1:5 suelo-agua y medición con potenciómetro, P disponible por Bray II y cuantificación por espectrofotometría (UV-VIS), cationes intercambiables (Ca, Na, Mg y K) extraídos en acetato de amonio 1N a pH 7 y cuantificados por espectrofotometría de absorción atómica, microelementos (Fe, Mn, Cu, Zn disponibles) por Olsen modificado y cuantificados por espectrofotometría de absorción atómica, materia orgánica por Walkley & Black, azufre y boro disponibles extraídos con fosfato monobásico de calcio.

2.1. Análisis estadístico

Los puntos de muestreo fueron georreferenciados para realizar el análisis geoestadístico con las 16 propiedades analizadas. Se aplicó el análisis de componentes principales (ACP) y de los componentes de mayor aporte se seleccionó una variable fisicoquímica para utilizarla como indicadora para la división del lote en áreas homogéneas. Para el análisis geoestadístico, se evaluó

la presencia de anisotropía utilizando cuatro ángulos: 0, 45, 90, 135. Sin embargo, estos ángulos se modificaron a conveniencia para buscar una mejor representación de los posibles efectos anisotrópicos.

En caso de encontrar anisotropía, se aplicó una transformación anisotrópica al semivariograma. Esto implica ajustar el variograma en función del ángulo de anisotropía y la relación entre los ejes mayor y menor. Para la separación del lote en zonas de manejo homogéneo, se utilizó el procedimiento fuzzy clustering (Giordani et al., 2022). Para evaluar el rendimiento de un cultivo bajo las condiciones de la zonificación resultante, se aplicó la simulación por el método de QUEFTS (Sattari et al., 2014).

3. RESULTADOS

3.1. Propiedades del suelo en general

Según el análisis de fertilidad química del suelo (Tabla 1), la mayoría de las propiedades se encuentran en niveles por encima del óptimo, a excepción de la MOS (con baja concentración) y las concentraciones de K, Mn y B que se encontraron en promedio en niveles óptimos. Sin embargo, tanto el K como el Mn, que en promedio están en el óptimo, presentaron una alta variabilidad en el terreno, de modo que en algunos sectores estuvieron por encima del óptimo, y en otros, por debajo. En el caso de potasio (K), el 32,1% de los puntos analizados se encontraron por encima del nivel óptimo, mientras que el 43,8% estuvieron por debajo de este. Para el Mn, el 18,1% de los puntos analizados estuvieron por encima del óptimo y el 43,8% de los puntos estuvieron por debajo del nivel óptimo.

Tabla 1. Estadísticas descriptivas de las propiedades de fertilidad química del suelo

Propiedad	Unidades	Mínimo	Promedio	Máximo	SD	CV	Rango Ideal (*)	Valor
pH		5,75	6,14	6,53	0,17	2,76		
CE	dS/m	0,49	1,02	2,39	0,25	24,98		
MOS	g/100g	2,00	3,89	4,83	0,42	10,85	10.0 - 12.0	Bajo
P	mg/Kg	29,42	69,46	102,82	12,30	17,70	25.0-40.0	Alto
S	mg/Kg	23,39	54,48	116,30	15,97	29,32		Alto
Ca	cmol(+)/100g	10,26	15,29	19,99	1,56	10,19	5.0-10.0	Alto
Mg	cmol(+)/100g	2,42	3,25	3,80	0,22	6,66	2.5-3.0	Alto
K	cmol(+)/100g	0,10	0,38	1,33	0,22	57,81	0.3-0.4	Bien
Na	cmol(+)/100g	0,62	1,19	2,02	0,27	22,40	< 1.0	Alto
CICE	cmol(+)/100g	13,55	20,11	25,74	1,84	9,13	15.0-20.0	Alto
Fe	mg/kg	116,00	245,30	410,80	61,87	25,22	50.0-100.0	Alto
Cu	mg/kg	2,00	3,11	4,81	0,56	18,10	2.0 -3.0	Alto
Mn	mg/kg	8,97	17,39	72,20	9,45	54,32	15.0-20.0	Bien
Zn	mg/kg	19,00	34,86	51,01	5,72	16,40	3.0-4.0	Alto
B	mg/kg	0,13	0,62	1,06	0,09	14,97	0.4-0.9	Bien

Fuente: Adaptado de (Gomez Sanchez, 2011)

3.2. Análisis geoestadístico

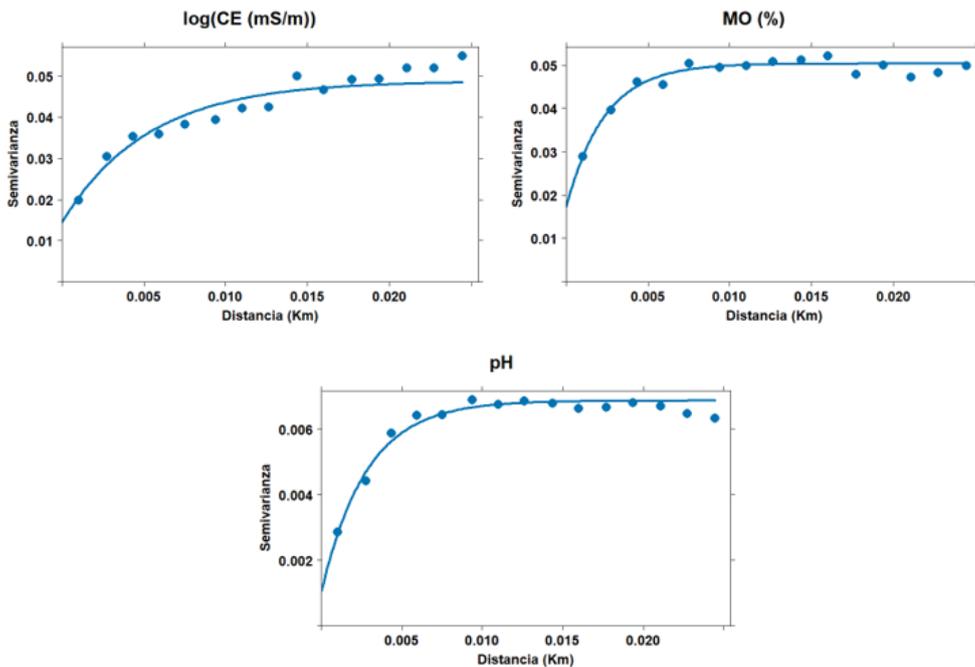


Figura 1. Variogramas para la condición de log (CE), concentración de MO (%), y pH del suelo

Tabla 2. Parámetros de los modelos representativos del semivariograma para las propiedades del suelo seleccionadas, y nivel de ajuste del modelo

Propiedad	Modelo	Nugget	Psill	Range	Q	SSE	R2
CE	Log exponencial	0,0145	0,0342	0,0053	0,576	4492,6100	0,9844
pH	Exponencial	0,0011	0,0058	0,0028	0,810	39,7263	0,9933
MO	Exponencial	0,0126	0,0517	0,0018	0,756	4038,9730	0,9894

En la figura 2 se observa que para la CE se utilizó Kriging ordinario, y para MOS y pH, Kriging universal, con modelos cuadráticos en función de la longitud y latitud de los puntos de muestreo georreferenciados.

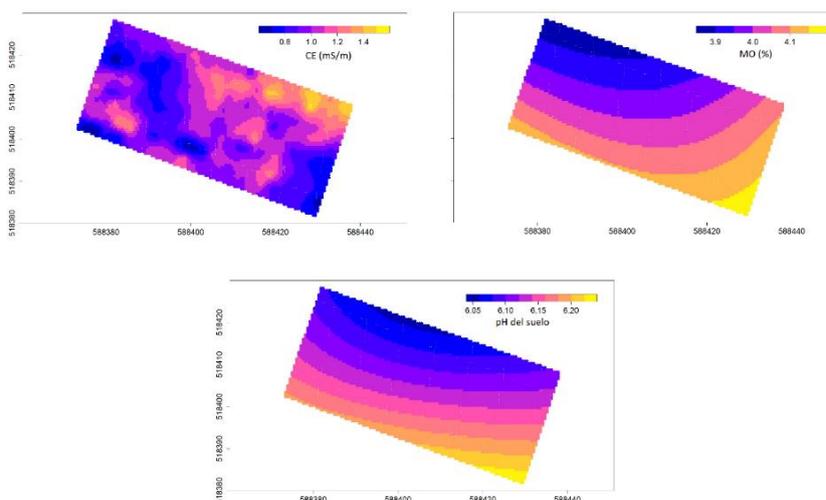
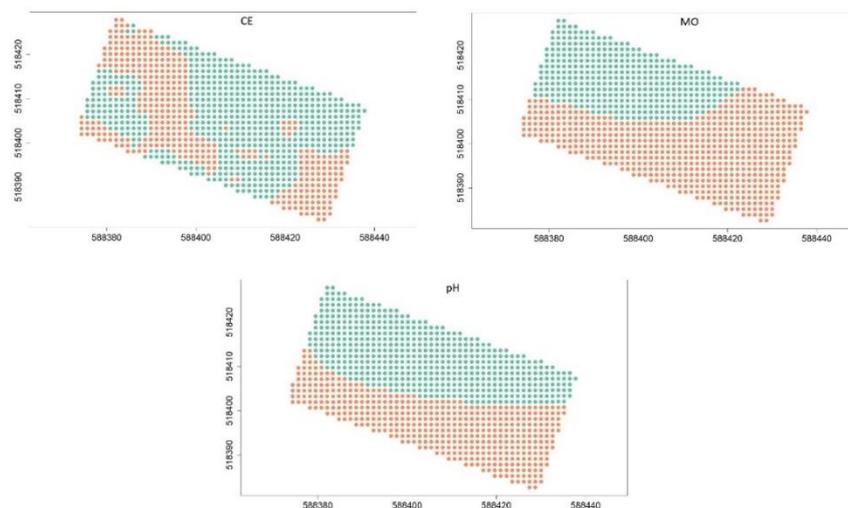


Figura 2. Interpolación de las condiciones del suelo en cuanto a log (CE), concentración de MOS (%), y pH

Tabla 3. Parámetros de ajuste de los resultados del análisis Kriging para las propiedades del suelo seleccionados, según la validación cruzada

Propiedad	log(CE)	pH	MOS
Raíz del error medio cuadrático	0,1593	0,0626	0,2101
Error cuadrático medio adimensional	1,0065	0,9530	1,0428
Pseudo R2	0,5121	0,8574	0,6443
r(observado y predichos)	0,7158	0,9261	0,8033
r(predichos y residuales)	0,0265	-0,0154	-0,0540

En la figura 3 se observa la división del lote experimental en dos zonas de manejo homogéneo (zona verde, 1, zona roja, 2), en tres casos según se utilice como criterio de división los niveles de conductividad eléctrica del suelo (zona 1: CE < 0,95 mS/m) (a), la concentración de MOS (zona 1: MO < 3,95%) (b), o el pH (zona 1: pH < 6,14) (c). Para la división, se utilizó el procedimiento fast cluster con base en la interpolación por Kriging de los puntos de muestreo georreferenciados.

**Figura 3.** División del lote experimental en dos zonas de manejo homogéneo

En la figura 4 se muestra los valores de la correlación de las propiedades del suelo entre las dos zonas resultantes según se utilice la concentración de MOS, pH o CE como criterio de zonificación (izquierda), y resultado de la correlación de la variable utilizada como criterio de zonificación y el resto de las propiedades del suelo (derecha). Entre más se alejen de cero (línea azul) las diferencias o correlaciones de cada propiedad, la zonificación será más efectiva. La zonificación por MOS resalta especialmente las diferencias de concentración de K y P. La zonificación por pH presenta especial ventaja para las diferencias en las concentraciones de Zn, Fe y Cu, además del pH. La zonificación por CE muestra una alta correlación directamente proporcional con las concentraciones de S y Na. La conductividad eléctrica (CE) muestra una alta correlación directamente proporcional con las concentraciones de azufre (S) y sodio (Na).

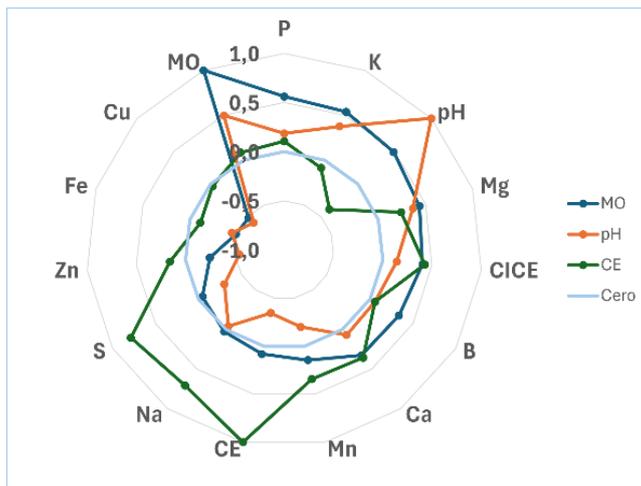


Figura 4. Valores de la correlación de las propiedades del suelo

3.3. Análisis geoestadístico

La tabla 4 muestra el análisis de componentes principales para las propiedades del suelo. El primer componente está asociado en mayor medida con el Fe y Cu con una relación directa proporcional e inversamente proporcional con el MOS. El segundo componente se asocia a la CE, que cuando es alto con el Na y S, se acompaña de bajos niveles de pH y K. El tercer componente está asociado con el pH, que cuando es alto se acompaña de altas concentraciones de S y Na, y presenta bajos niveles de Zn y P.

Tabla 4. Análisis de componentes principales para las propiedades del suelo

Propiedad	PC1	PC2	PC3
Fe	0,3845	0,0899	-0,0043
Cu	0,3814	0,0011	-0,0612
Zn	0,1972	-0,1616	-0,5086
S	-0,0041	-0,4094	0,2040
Mn	-0,0343	-0,1977	-0,3476
CE	-0,0499	-0,3965	0,0209
Na	-0,1240	-0,4459	0,2782
B	-0,1272	0,1061	-0,3264
K	-0,1415	0,3352	0,0529
P	-0,2236	0,0839	-0,4175
Ca	-0,2668	-0,2656	-0,2052
Mg	-0,2794	-0,1118	0,1657
pH	-0,2886	0,2668	0,3287
CICE	-0,2942	-0,2626	-0,1078
MO	-0,3490	0,1567	-0,1104

En la figura 5 se muestra la respuesta simulada en rendimiento del cultivo de papa a la fertilización potásica y nitrogenada (N = {0, 200}) para dos tipos de suelo (S = {1, 2}) resultantes de la zonificación por la MOS (figura a la izquierda) o por pH (figura a la derecha).

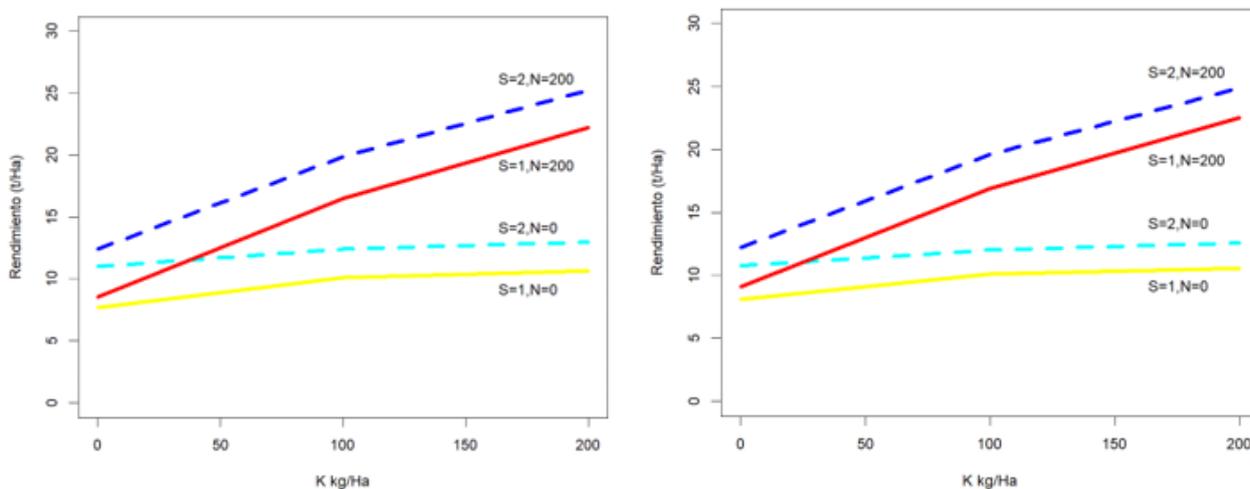


Figura 5. Respuesta simulada en rendimiento del cultivo de papa a la fertilización potásica y nitrogenada

4. DISCUSIÓN

4.1. Propiedades del suelo en general

Según los resultados obtenidos la alta variabilidad del K coincide con los resultados obtenidos por Vasu et al. (2017), quienes encontraron que el K y el S mostraron alta heterogeneidad respecto a otras propiedades, en parte por la presencia de valores extremos, que tuvieron que ser removidos para el análisis geoestadístico. Para el caso del S, se considera que el límite crítico es de 10 mg kg⁻¹, y los valores altos se pueden atribuir a el pH bajo (Mondal et al., 2022).

4.2. Análisis geoestadístico

Para las propiedades fisicoquímicas seleccionadas como claves para la zonificación, como son el pH, CE y la MOS, se aplicó el análisis de la autocorrelación espacial, y en todos los casos, se prefirió el modelo exponencial como el más apropiado para representarla (Figura 1, Tabla 2), frente a los modelos gaussiano y esférico. Según el valor Q, se observa que el pH es la propiedad que presenta mayor variabilidad y menor autocorrelación respecto a la MOS y la CE.

De manera similar, Nyengere et al. (2023) encontraron una fuerte autocorrelación espacial para las propiedades del suelo tal como el pH, P, carbono y nitrógeno totales, y los rangos resultantes según el modelo del semivariograma estuvieron entre los 82 y 180 m. En contraste, para esta investigación, los rangos fueron menores a 20 m.

Seguidamente, se evaluó la existencia de tendencias a lo largo y ancho del terreno para las tres propiedades clave, y cuando los resultados fueron positivos, se aplicaron diferentes modelos espaciales polinomiales para representar las tendencias. Con el mejor modelo polinomial encontrado por su ajuste y precisión, se trabajó la interpolación de valores con el Kriging universal. Según los resultados, para la CE no se observó una tendencia espacial a lo largo del terreno evaluado, por lo cual se aplicó la interpolación de Kriging ordinario. Para el pH y la MOS se observó una tendencia de estas condiciones a aumentar en la medida que se avanzaba hacia el sur del lote, por lo cual se evaluaron modelos lineales y cuadráticos, entre los cuales los modelos cuadráticos fueron los más ajustados (Figura 2).

Los modelos de interpolación fueron evaluados con validación cruzada (Tabla 3), y se observaron los mejores resultados de ajuste con el pH, la MOS y el CE, en su orden. En resumen, entre las variables analizadas para servir como zonificadoras, se destaca el pH por el mayor ajuste obtenido en los modelos espaciales. Le siguió en orden la MOS, y finalmente, el logaritmo de la CE.

4.3. División del lote en zonas de manejo homogéneo

La división del lote utilizando por separado cada una de las condiciones del suelo seleccionadas resultó diferente según cada caso. Para comenzar, y para efectos de manejo homogéneo, la conductividad eléctrica no permitió una división fácil de operar, debido a que las variaciones de esta condición se presentaron en forma de parches irregulares.

Las variaciones de conductividad eléctrica estuvieron en el rango de 0,8 y 1,4 mS/m, lo cual no afecta significativamente el rendimiento de algunos cultivos, como la papa. Sumado a esto, no se observaron correlaciones importantes entre la CE y la mayoría de las propiedades, a excepción de la concentración de Na y S. Por lo tanto, la zonificación del lote por esta propiedad no resulta adecuada en estas circunstancias.

Con base en el análisis cluster, se definieron dos estrategias de zonificación, según se considerara la variación de la MOS, o del pH del suelo. Dado que las variaciones de estas propiedades no son grandes, como se observó en las estadísticas descriptivas de las variables analizadas, se planteó una división del lote en dos partes (Figura 3). Con base en el resultado, se hicieron las comparaciones estadísticas de fertilidad entre las zonas resultantes, según se utilizara la MOS o el pH como criterio de división del lote.

Según los resultados, la división del lote con base la concentración de la MOS o el pH coinciden en un área correspondiente al 83,6%. En contraste, el porcentaje de coincidencia en la zonificación por MOS o CE es el 55,5%.

Para evaluar la efectividad de una u otra división del lote, vale la pena comparar las diferencias que resultan en las propiedades del suelo analizadas según la condición utilizada para zonificar. Cuando se analiza la MOS como criterio para zonificar el lote, las diferencias importantes entre zonas se aprecian en las concentraciones de K y P, además de la MOS. En caso de utilizar el pH, las diferencias se centran especialmente en los elementos menores Zn, Fe y Cu, además del pH. Y si se utiliza la CE, se aprecian diferencias importantes en Na y S, además de la misma CE.

El análisis de las diferencias en las propiedades según la zonificación aplicada corresponde por igual con los resultados de las correlaciones entre cada propiedad fisicoquímica utilizada para la zonificación y las propiedades químicas del suelo por nutriente. Es decir que, si la CE está altamente correlacionada con la concentración de Na y S, la división del lote con base en la CE resaltarán las diferencias con esas dos propiedades con las que se correlaciona, como era de esperarse (Figura 4).

Según estos resultados, la división del lote de acuerdo con los niveles de la MOS permitirá diferenciar con mayor acierto el manejo de la fertilización de P y K, aunque en este caso, lo importante es el K por las variaciones que se presentan, como se mencionó anteriormente. Por otra parte, la división del lote según los niveles de pH resaltarán la diferencia en la concentración de elementos menores, aspecto que no se puede descuidar dados los excesos de nutrientes presentes en el suelo y los posibles desbalances que afectan su disponibilidad e interfieren en la disponibilidad de otros elementos para las plantas. La división del lote por la CE resaltarán las diferencias en el Na y S disponibles; este resultado se diferencia con el obtenido por Mondal et al. (2022), en cuanto que para ellos el pH bajo explica mejor los valores altos de CE.

Por su parte, Ramzan et al. (2021) encontraron una correlación negativa entre el pH del suelo y la disponibilidad del Fe, Cu, Mn y Ni, pero también encontraron una correlación positiva del Fe, Cu y Zn con el carbono orgánico del suelo, una parte vital de la MOS, lo que no se observó en este caso.

En las áreas de la provincia Zhejiang de China, cubiertas con árboles de *Torreya grandis*, la distribución espacial de las propiedades del suelo como son los contenidos de nitrógeno, fósforo y

potasio disponibles fue similar a la de la materia orgánica, pero considerando que el nivel de variación en la acidificación fue relativamente pequeño en esta área de estudio (L. Bai et al., 2022).

4.4. Análisis de componentes principales

El análisis de componentes principales recogió el 91,4% de la variabilidad total con los tres primeros ejes (Tabla 4). En ellos puede observarse el papel que juegan las variables de zonificación, y qué propiedades químicas del suelo se le asocian. Para la interpretación de resultados, se consideran valores altos de una propiedad del suelo si están por encima del promedio, y bajos, si lo contrario.

Puede considerarse al primer componente principal como el indicador de la fertilidad general del suelo, que recoge el 59,2% de la variabilidad del conjunto de propiedades analizadas. En este componente se resalta el aporte de la concentración de la MOS, los cationes y el pH del suelo, pero en sentido negativo las altas concentraciones de los elementos menores Fe y Cu. El segundo componente está asociado con la conductividad eléctrica del suelo y las concentraciones de Na y S, y explica un 26,2% de la variabilidad total. El tercer componente reúne los puntos con niveles altos de pH, Na y S, donde concurren niveles bajos de P, Zn y Mn, y explica un 6% de la variabilidad total.

Según estos resultados, la variabilidad más grande se recoge en el primer componente del ACP, en el cual se observa el peso importante que juegan la alta concentración de la MOS y el pH por encima del promedio, pero así mismo las bajas concentraciones de elementos menores como el Fe y Cu.

Yadav et al. (2022) encontraron que en el análisis del PCA, el primer componente recogió el N disponible y la extracción de Zn, Cu y Mn, y ya que estos elementos estuvieron asociados con la MOS; este componente se denominó "factor efectivo en la disponibilidad del N". En el tercer componente encontraron que el K disponible también estuvo asociado con el carbono orgánico del suelo, de modo que se asoció con el factor que influía en la fertilidad y rendimiento del cultivo.

4.5. Simulación del rendimiento del cultivo en las zonas de manejo homogéneo

Con el simulador QUEFTS se calculó el rendimiento del cultivo de papa según las condiciones de fertilidad de cada suelo resultante de la zonificación planteada según se tomara como criterio la variabilidad de la MOS o el pH (Figura 5). Según los resultados, las diferencias de desempeño del cultivo según se zonifica por la MOS o el pH son mínimas. Los mejores rendimientos requieren una fertilización combinada de N y K. Además, en el suelo de la zona 2 (S=2) se alcanzan los mayores rendimientos respecto a la zona 1 (S=1).

De manera similar, como resultado de la zonificación del suelo con base en las propiedades del suelo, Salem et al. (2024) resaltaron que las propiedades clave que diferenciaron los lotes de manejo homogéneo de la fertilización fueron el pH, la CE y el contenido de cal.

En el presente caso, la zonificación por pH presenta la ventaja de considerar algunos elementos menores para la diferenciación, que pueden ser importantes para la respuesta del cultivo. Por ejemplo, el exceso de Fe puede afectar la disponibilidad de P. En algún suelo, este factor puede ser importante, aunque el modelo Quefts no incluye la posibilidad de vincular a los elementos menores. El pH del suelo afectará no sólo las propiedades químicas del suelo. Cuando el pH se encuentra en el rango de 6-8 se favorece la biodiversidad que puede promover el crecimiento de los cultivos, el ciclaje de nutrientes y la estabilidad de los agregados, lo cual a su vez incrementa la MOS (Jing et al., 2024).

Por otro lado, la zonificación por la MOS presenta la ventaja de que la MOS no sólo afecta positivamente las propiedades químicas sino también las físicas, en aspectos tan importantes como la estructura del suelo, la capacidad de retención de humedad y de nutrientes, entre otras. Además,

el buen manejo de la MOS puede ayudar a resolver problemas del exceso de micronutrientes (L. Wang et al., 2024).

La aplicación variable de fertilizante, en el caso del ejemplo, indica la posibilidad de manejar de forma diferente cada tipo de suelo resultante de la zonificación, y alcanzar mejores rendimientos respecto a la aplicación homogénea, y seguramente una mejor sostenibilidad del sistema a largo plazo.

Aunque las propiedades químicas son importantes para evaluar la heterogeneidad del suelo y su impacto en los cultivos agrícolas, las propiedades físicas también pueden jugar un rol muy importante, especialmente en cuanto afectan la disponibilidad de agua y el crecimiento y respiración de las raíces (G. Wang et al., 2024). Por lo tanto, se hace necesario considerar el efecto de la heterogeneidad en la humedad del suelo y las variaciones climáticas importantes como la ENSO (Pántano et al., 2022).

CONCLUSIONES

Se demostró la significativa variabilidad espacial de las propiedades del suelo. El análisis mediante PCA y Kriging de las propiedades fisicoquímicas como la MOS, el pH y la conductividad eléctrica permitió realizar una valoración adecuada para seleccionar una como indicadora clave para la delimitación de zonas de manejo homogéneas. La zonificación basada en MOS resultó en una diferenciación más precisa para la gestión de la fertilización con P y K. Por el contrario, la zonificación según el pH evidenció diferencias en las concentraciones de micronutrientes. La simulación con el modelo QUEFTS mostró el potencial de incrementar el rendimiento del cultivo mediante una fertilización dirigida según las zonas definidas. En el presente caso, la zonificación con base en la MOS parece ser la más adecuada para mejorar el rendimiento del cultivo de papa con el manejo diferencial de la fertilización con nitrógeno y potasio. Se recomienda ampliar futuras investigaciones incluyendo propiedades físicas del suelo y factores climáticos para optimizar el manejo de las zonas.

FINANCIAMIENTO

Este estudio fue apoyado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural – MADR y la Universidad Nacional de Colombia a través del convenio de cooperación específico M513-01 entre la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – AGROSAVIA y la Universidad Nacional de Colombia.

CONFLICTO DE INTERESES

No existe ningún tipo de conflicto de interés relacionado con la materia del trabajo.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización, curación de datos, análisis formal, investigación, metodología, software, redacción - borrador original, redacción - revisión y edición: Galindo-Pacheco, J., Vargas-Díaz, R., Martínez-Niño, C. & Franco-Florez, C.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ameer, S., Cheema, M. J. M., Khan, M. A., Amjad, M., Noor, M., & Wei, L. (2022). Delineation of nutrient management zones for precise fertilizer management in wheat crop using geostatistical techniques. *Soil Use and Management*, 38(3), 1430–1445.

<https://doi.org/10.1111/sum.12813>

- Bai, J., Wang, N., Hu, B., Feng, C., Wang, Y., Peng, J., & Shi, Z. (2023). Integrating multisource information to delineate oasis farmland salinity management zones in southern Xinjiang, China. *Agricultural Water Management*, 289, 108559. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108559>
- Bai, L., Zhang, Y., Wang, M., He, Y., Ye, T., & Zhao, K. (2022). Spatial Heterogeneity of Selected Soil Nutrients Related to *Torreya grandis* cv. Merrillii Plantation in Southeastern China. *Phyton*, 91(10), 2221–2233. <https://doi.org/10.32604/phyton.2022.021422>
- Chen, W., & Liu, G. (2024). A Novel Method for Identifying Crops in Parcels Constrained by Environmental Factors Through the Integration of a Gaofen-2 High-Resolution Remote Sensing Image and Sentinel-2 Time Series. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17, 450–463. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3329987>
- D'Acunto, L., Iglesias, M. A., Poggio, S. L., & Semmartin, M. (2024). Land cover, plant residue and soil microbes as drivers of soil functioning in temperate agricultural lands. A microcosm study. *Applied Soil Ecology*, 193, 105133. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105133>
- Deng, X., Huang, Y., Yuan, W., Zhang, W., Ciais, P., Dong, W., Smith, P., & Qin, Z. (2023). Building soil to reduce climate change impacts on global crop yield. *Science of The Total Environment*, 903, 166711. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166711>
- Giordani, P., Ferraro, M. B., & Serafini, A. (2022). fclust: Fuzzy Clustering. In *CRAN: Contributed Packages*. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.fclust>
- Gomez Sanchez, M. I. (2011). *Guia de Recomendación y Manejo de Nutrientes Febrero-2011 | Fertilizante | Calcio*. <https://es.scribd.com/document/382579143/Guia-de-Recomendacion-y-Manejo-de-Nutrientes-Febrero-2011>
- Haroon, Z., Cheema, M. J. M., Saleem, S., Amin, M., Anjum, M. N., Tahir, M. N., Hussain, S., Zahid, U., & Khan, F. (2023). Potential of Precise Fertilization through Adoption of Management Zones Strategy to Enhance Wheat Production. *Land*, 12(3), 540. <https://doi.org/10.3390/land12030540>
- Jing, Y., Bi, R., Sun, W., Zhu, H., Ding, H., & Jin, H. (2024). Whether Wheat–Maize Rotation Influenced Soil Organic Carbon Content in Sushui River Basin. *Land*, 13(6), 859. <https://doi.org/10.3390/land13060859>
- Liu, W., Lu, F., Chen, G., Xu, X., & Yu, H. (2021). Site-specific management zones based on geostatistical and fuzzy clustering approach in a coastal reclaimed area of abandoned salt pan. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 81(3), 420–433. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392021000300420>
- McCormick, S., Jordan, C., & Bailey, J. S. (2009). Within and between-field spatial variation in soil phosphorus in permanent grassland. *Precision Agriculture*, 10(3), 262–276. <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9099-4>
- Mondal, B. P., Sahoo, R. N., Bandyopadhyay, K. K., Das, B., Arora, A., & Mukherjee, J. (2022). Assessment of spatial variability of soil available sulphur using geostatistical techniques in a part of deccan plateau of India. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 70(2), 237–242. <https://doi.org/10.5958/0974-0228.2022.00023.8>
- Nyengere, J., Okamoto, Y., Funakawa, S., & Shinjo, H. (2023). Analysis of spatial heterogeneity of soil physicochemical properties in northern Malawi. *Geoderma Regional*, 35, e00733. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2023.e00733>
- Pántano, V. C., Holzman, M. E., Penalba, O. C., & Rivas, R. (2022). ENSO Signal on Subseasonal Precipitation Distribution and Soil Moisture Response in the Argentine Pampas. *Pure and*

Applied Geophysics, 179(2), 879–896. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-02949-6>

- Pizarro, S., Pricope, N. G., Figueroa, D., Carbajal, C., Quispe, M., Vera, J., Alejandro, L., Achallma, L., Gonzalez, I., Salazar, W., Loayza, H., Cruz, J., & Arbizu, C. I. (2023). Implementing Cloud Computing for the Digital Mapping of Agricultural Soil Properties from High Resolution UAV Multispectral Imagery. *Remote Sensing*, 15(12), 3203. <https://doi.org/10.3390/rs15123203>
- Ramzan, S., Nazir, S., Ashraf, I., Wani, M. A., Wani, Z. M., & Shafiq, M. ul. (2021). Management zone delineation and spatial distribution of micronutrients in cold-arid region of India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(7), 433. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09216-6>
- Salem, H. M., Schott, L. R., Piaskowski, J., Chapagain, A., Yost, J. L., Brooks, E., Kahl, K., & Johnson-Maynard, J. (2024). Evaluating Intra-Field Spatial Variability for Nutrient Management Zone Delineation through Geospatial Techniques and Multivariate Analysis. *Sustainability*, 16(2), 645. <https://doi.org/10.3390/su16020645>
- Sattari, S. Z., van Ittersum, M. K., Bouwman, A. F., Smit, A. L., & Janssen, B. H. (2014). Crop yield response to soil fertility and N, P, K inputs in different environments: Testing and improving the QUEFTS model. *Field Crops Research*, 157, 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.005>
- Tokumoto, I., Inoue, K., Koga, N., Noguchi, T., & Ishikawa, Y. (2023). Recovery of a salinized tomato field in a coastal polder after the 2016 Kumamoto Earthquake in Japan. *Smart Agricultural Technology*, 5, 100287. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2023.100287>
- Vasu, D., Singh, S. K., Sahu, N., Tiwary, P., Chandran, P., Duraisami, V. P., Ramamurthy, V., Lalitha, M., & Kalaiselvi, B. (2017). Assessment of spatial variability of soil properties using geospatial techniques for farm level nutrient management. *Soil and Tillage Research*, 169, 25–34. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.01.006>
- Wang, G., Cissé, G., & Staunton, S. (2024). Changes in chemical fractionation of copper and zinc in soil as a function of incubation moisture content and organic matter amendments. *Chemosphere*, 351, 141198. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141198>
- Wang, L., Guo, M., Chen, Z., Zhang, X., Zhou, P., Liu, X., Qi, J., Wan, Z., Xu, J., & Zhang, S. (2024). Quantifying the contributions of factors influencing the spatial heterogeneity of soil aggregate stability and erodibility in a Mollisol watershed. *CATENA*, 239, 107941. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107941>
- Yadav, K. K., Mali, N. L., Kumar, S., Surya, J. N., Moharana, P. C., Nogiya, M., & Meena, R. L. (2022). Assessment of soil quality and spatial variability of soil properties using geo-spatial techniques in sub-humid southern plain of Rajasthan, India. *Journal of the Indian Society of Soil Science*, 70(1), 69–85. <https://doi.org/10.5958/0974-0228.2022.00004.4>
- Yang, R., Harrison, M. T., & Wang, X. (2023). Current State and Limiting Factors of Wheat Yield at the Farm Level in Hubei Province. *Agronomy*, 13(8), 2043. <https://doi.org/10.3390/agronomy13082043>
- Yao Wang, Aurangzeib, M., & Zhang, S. (2022). Topography and Land Management Change the Heterogeneity of Soil Available Nitrogen in a Mollisol Watershed of Northeastern China. *Eurasian Soil Science*, 55(2), 200–211. <https://doi.org/10.1134/S1064229322020132>