

Variabilidad espacial de los atributos químicos del suelo en el rendimiento y calidad de café

Spatial variability of the chemical properties of the soil in the coffee yield and quality

Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo no rendimento e qualidade de café

Felipe Andrés Rodríguez-Garay,¹ Jesús Hernán Camacho-Tamayo,² Yolanda Rubiano-Sanabria³

¹ Estudiante de Maestría en Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía. Bogotá, Colombia. farodriguezg@unal.edu.co

² PhD, Universidad Nacional de Colombia. Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola. Bogotá, Colombia. jhcamachot@unal.edu.co

³ PhD, Universidad Nacional de Colombia. Profesora Asociada, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agrarias, Departamento de Agronomía. Bogotá, Colombia. yrubianos@unal.edu.co

Fecha de recepción: 5/28/2015

Fecha de aceptación: 26/02/2016

Para citar este artículo: Rodríguez-Garay FA, Camacho-Tamayo JH, Rubiano-Sanabria Y. Variabilidad espacial de los atributos químicos del suelo en el rendimiento y calidad de café. *Corpoica Cienc Tecnol Agropecuaria*. 17(2):237-254

Resumen

La importancia ambiental y económica del uso racional de insumos para una agricultura competitiva y sostenible hace necesaria una mayor comprensión de las diferentes variables que intervienen en la producción agrícola. El objetivo del presente estudio fue establecer el comportamiento espacial de los atributos químicos del suelo y su relación con el rendimiento y la calidad del café en un Typic Hapludands. El muestreo se realizó de manera aleatoria en 64 puntos georreferenciados a una profundidad de -0,20 m. Los datos fueron analizados a través de estadística descriptiva, geoestadística, correlaciones lineales y los métodos multivariados clúster y componentes principales

(ACP). La interpolación se realizó a través de kriging. El análisis descriptivo mostró alta variabilidad para los atributos químicos y los demás mostraron dependencia espacial excepto el contenido de B en el suelo. Se presentó una correlación de 35,88 % entre el contenido de carbono orgánico del suelo (CO) y el rendimiento, además de una correlación negativa de 40,98 % entre la merma en trilla y el contenido de Ca en el suelo. El análisis de componentes principales (ACP) y clúster mostraron poca relevancia para los atributos Na, P, B y rendimiento. A partir del análisis clúster y la distribución espacial, se propone un manejo para el cultivo de café.

Palabras clave: kriging, *Coffea arabica*, análisis de componentes, clúster, rendimiento de cultivos

Abstract

Given the environmental and economic importance of the rational use of inputs for a competitive and sustainable agriculture, a greater understanding of the different variables involved in agricultural production is required. Therefore, the aim of this study was to establish the spatial behavior of the chemical properties of the soil and their relationship with coffee yield and quality on Typic Hapludands. Sampling was done randomly in 64 georeferenced points to a depth of -0.20. Data were analyzed using descriptive and geostatistics statistics, linear correlations and multivariate methods cluster and principal components (PCA); additionally, the interpolation of data was conducted

using the kriging method. The descriptive analysis showed high variability for chemical attributes, in terms of geostatistics, the results showed spatial dependence for all attributes except for the content of B in the soil. There was a 35.88 % correlation between the soil attributes (SOC content) and the attributes of the crop (yield). Besides, an inverse relationship of 40.98 % between the reduction in threshing (decrease) and the Ca content in soil was observed. Both principal analysis (PCA) components and cluster analysis showed less relevance to the analysis on the attributes Na, P, B and yield. From cluster analysis and spatial distribution, management of coffee growing is proposed.

Keywords: Krigging, *Coffea arabica*, Component analysis, Cluster, Crop yield

Resumo

A importância ambiental e econômica do uso racional de insumos para uma agricultura competitiva e sustentável faz necessária uma maior compreensão das diferentes variáveis que intervêm na produção agrícola. O objetivo do presente estudo foi estabelecer o comportamento espacial dos atributos químicos do solo e a sua relação com o rendimento e a qualidade do café em um Typic Hapludands. A amostragem se realizou de maneira aleatória em 64 pontos georreferenciados a uma profundidade de -0,20 m. Os dados foram analisados através de estatística descritiva, geoestatística, correlações lineares e os métodos multivariados clúster e componentes principais (ACP). A interpolação realizou-se

através de kriging. A análise descritiva mostrou alta variabilidade para os atributos químicos e os demais mostraram dependência espacial exceto o conteúdo de B no solo. Apresentou-se uma correlação de 35,88 % entre o conteúdo de carbono orgânico do solo (CO) e o rendimento, além do mais de uma correlação negativa de 40,98 % entre a diminuição em trilha e o conteúdo de Ca no solo. A análise de componentes principais (ACP) e clúster mostraram pouca relevância para os atributos Na, P, B e rendimento. A partir da análise clúster e a distribuição espacial, propõe-se um manejo para a cultura de café.

Palavras chaves: krigging, *Coffea arabica*, análise de componentes, clúster, rendimento de culturas

Introducción

La variabilidad espacial del suelo ocurre de manera natural por causa de los factores y procesos de formación del suelo y puede ser atribuida a cambios en el relieve, la forma del terreno o el microclima, lo que da como resultado cambios en la cobertura vegetal y en procesos de erosión-deposición de materiales, que alteran la uniformidad del suelo (Zhao et al. 2007).

Estas variaciones pueden ser divididas entre sistemática y aleatoria. La primera, conocida como variación inerte, está en función de la forma de la tierra, geomorfología o factores de formación (cronosecuencias, litosecuencias, toposecuencias, biosecuencias y climosecuencias); y la segunda, conocida como dinámica, no puede ser explicada y depende de factores como la actividad humana, la flora y la fauna (Couto et al. 1997). Por esto, un suelo afectado por las actividades agrícolas, difiere de su entorno por causa del manejo específico que ha tenido, pero este tiende a ser homogéneo, particularmente en las primeras capas del suelo, en donde se concentran actividades como mecanización, riego, fertilización, compostaje, incorporación de residuos de cosecha y rotación de cultivos (Huang et al. 2007).

En Colombia, los estudios sobre las relaciones de los atributos del suelo y la producción de café se han centrado en el efecto de deficiencias y toxicidades de algunos elementos sobre el volumen de producción (Mestre y Ospina 1994; Sadeghian 2010), estudios que utilizan una respuesta puntual, a partir de muestras compuestas de fertilidad para estimar el volumen de producción.

En consecuencia, el manejo de la fertilización, sin considerar la variabilidad espacial del suelo, da como resultado un uso ineficiente de los nutrientes aplicados, lo que conduce a un menor rendimiento cuando el suministro es inadecuado, lo que incide en el incremento de los costos y el riesgo de contaminación ambiental (Weijun et al. 2010).

Es allí donde radica la ventaja que da el conocimiento de la distribución espacial de los atributos

del suelo, en donde se aplican insumos de acuerdo a las condiciones del sitio, en el momento adecuado, en las cantidades necesarias, a partir de zonas delimitadas cada vez menores y más homogéneas, en tanto la tecnología y los recursos lo permitan (Oliveira et al. 2008).

Este abordaje cobra especial importancia, gracias a la pérdida de competitividad del sector cafetero de Colombia en los mercados internacionales, debido al rápido crecimiento en producción en países como Vietnam, mejoras en los procesos industriales que permitieron la utilización de variedades robustas (Varangis et al. 2004) y la baja elasticidad de los precios en el mercado internacional, entre otras, donde la calidad se convirtió en la principal estrategia de competitividad para el país (Lis-Gutiérrez 2012).

Por lo anteriormente expuesto, el objetivo del presente estudio fue establecer el comportamiento espacial de los atributos químicos del suelo y su relación con el rendimiento y la calidad del café en un Typic Hapludands (Instituto Geográfico Agustín Codazzi 2000b), en el municipio de Sasaima (Cundinamarca), sitio escogido por sus condiciones ambientales y de suelo, que se encuentra catalogado como ecotopo 331A y que alberga a los municipios de Vergara, Supatá, La Vega, San Francisco, Villeta y Albán (Cundinamarca) (Alvarado et al. 2005).

Materiales y métodos

Área de estudio

El estudio se realizó en la vereda Guane del municipio de Sasaima (Cundinamarca), en un área de 7.500 m², ubicada en las coordenadas 4°56'58.9" N y 74°24'13" W a una altura aproximada de 1.570 msnm. El terreno se encuentra cultivado con café Castillo Santa Bárbara de cuatro años en monocultivo, bajo sombrío y con densidad de siembra de 5.000 plantas/ha⁻¹ fertilizado según análisis de suelos. El estudio general de suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (2000b), señaló que el suelo es un Typic Hapludands y la zona corresponde a un bosque muy húmedo premontano (bmh-PM).

Mediciones en campo y toma de muestras

Se tomaron muestras puntuales del suelo a -0,20 m de profundidad en 64 puntos georreferenciados y distribuidos aleatoriamente en el lote. Las muestras fueron secadas al aire y pasadas por un tamiz de 2 mm, para luego determinar el pH con método potenciométrico; contenido de CO con el método Walkley & Black; contenidos de Ca, K, Mg y Na con el método acetato de amonio 1 M; acidez de cambio con KCl 1 M; CICE, P por método Bray II; contenidos de Fe, Zn, Cu, Mn y B con extracción con DTPA. Para los parámetros de producción, se consideró la merma en trilla (merma), factor de rendimiento (FR) y producción, a partir de la cosecha del grano en cuatro plantas cercanas al punto de muestreo, según el método utilizado por Silva et al. (2008), en dos pases de cosecha.

Estadística

Inicialmente se realizó un análisis descriptivo de los resultados, considerando la media, mediana, máximo, mínimo, coeficiente de variación (CV), asimetría, curtosis y prueba de normalidad con Shapiro-Wilk 5 %, a través del programa estadístico de libre uso R. El CV fue analizado con el criterio Warrick & Nielsen (1980), en el cual valores inferiores a 12 % son considerados de baja variabilidad, valores entre 12 % y 60 % variabilidad media y valores superiores a 60 % de alta variabilidad.

Por otra parte, los niveles de suficiencia de elementos se basaron en las consideraciones generales para interpretar análisis de suelos (Instituto Geográfico Agustín Codazzi 1995), y las correlaciones lineales de Pearson, para identificar correlaciones entre los atributos del suelo y los del cultivo.

Para el análisis geoestadístico se utilizó la teoría de variable regionalizada, la cual se encuentra descrita por Camacho-Tamayo et al. (2013). Para el ajuste de modelos teóricos de semivariogramas se seleccionaron los modelos con mayor coeficiente de determinación (r^2), los valores más cercanos a uno en el coeficiente de validación cruzada (CVC) y el mayor grado de dependencia espacial (GDE), siendo

el grado de dependencia espacial $GDE < 0,2$ muy bajo; $0,2 \leq GDE < 0,4$ bajo; $0,4 \leq GDE < 0,6$ moderado; $0,6 \leq GDE < 0,8$ alto y $0,8 \leq GDE < 100$ muy alto, según el criterio propuesto por Dalchiavon et al. (2013). El análisis de variabilidad espacial se realizó con el software GS+ v9. En las variables que presentaron dependencia espacial, se elaboraron mapas de contorno a través del método de interpolación krigging ordinario con el programa Surfer v. 10.

Por último, se realizó el análisis de componentes principales (CP) a los atributos del suelo y el análisis clúster, tanto para atributos como para puntos de muestreo con el algoritmo de Ward. Para el análisis de componentes principales y el análisis clúster se utilizó el programa estadístico de libre uso R.

Resultados y discusión

El pH presentó una media de 4,73 que corresponde a suelos muy fuertemente ácidos (tabla 1). La concentración de aluminio presentó una media de $3,5 \text{ cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$, en donde el pH y el contenido de Al se encuentran en un rango similar a los reportados por Ortiz et al. (2004), para andisoles en Antioquia, Caldas, Cauca y Risaralda, cultivados en café.

El contenido de CO muestra una concentración media de 5,7 %, siendo alta para clima medio ($> 4\%$), similar a los valores reportados por Ochoa et al. (2003) en andisoles bajo cultivo de café. Por otra parte, el contenido medio de P es de $30,1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, en el que se desconoce la cantidad fijada del elemento, puesto que las características ándicas son completamente aleatorias (Jaramillo 2009).

La concentración media para las bases fue de $0,46 \text{ cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ para K, $0,94 \text{ cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ para Mg, $3,5 \text{ cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ para Ca, $\text{cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ y $0,04 \text{ cmol}^+ \cdot \text{kg}^{-1}$ para Na, valores superiores en Mg y Ca a los obtenidos por Cortés et al. (2013) en un Typic Melanudadns, con pendientes inferiores al 1 %.

Según las consideraciones para interpretar análisis de suelos (Instituto Geográfico Agustín Codazzi 2000a), los contenidos para los micronutrientes

son: bajo para Cu, adecuado para Fe, bajo para Mn, alto para Zn y bajo para B. Cabe resaltar que las deficiencias en los micronutrientes no son comunes para el cultivo de café, por lo que estos normalmente no se incluyen en los planes de fertilización (Sadeghian 2010), razón por la cual y en particular el B presenta niveles tan bajos en este suelo.

La merma tuvo una media de 18,72 %, que corresponde a la diferencia porcentual del café pergamino seco (cps) obtenido y la almendra aprovechable para la trilla, en el que el tope para la comercialización en el país es de 24,5 %, dado que para obtener 70 kg de café excelso son necesarios 92,8 kg, de los cuales 18,7 kg corresponden a cisco y 4,1 kg a subproductos (Montilla et al. 2008).

Tabla 1. Estadística descriptiva de los atributos del suelo Typic Hapludands

Atributo	Media	Mediana	Mínimo	Máximo	CV (%)	Ck	Cs	W
pH	4,73	4,65	3,91	6,02	10,0	0,07	0,62	N
CO, %	5,68	5,87	1,52	8,49	29,0	-0,10	-0,53	N
Ca, cmol+.kg ⁻¹	3,50	2,58	0,17	14,03	89,0	1,78	1,46	*
K, cmol+.kg ⁻¹	0,46	0,33	0,12	3,1	96,0	18,84	3,92	*
Mg, cmol+.kg ⁻¹	0,94	0,65	0,11	4,43	91,0	3,13	1,69	*
Na, cmol+.kg ⁻¹	0,04	0,04	0,02	0,09	21,0	1,59	1,12	*
Al, cmol+.kg ⁻¹	3,49	2,88	0,0	11,76	85,0	0,34	1,02	*
CICE, cmol+.kg ⁻¹	8,48	7,87	2,30	17,04	37,0	0,09	0,79	*
P, mg.kg ⁻¹	30,11	24,88	6,20	91,67	58,0	1,89	1,43	*
Cu, mg.kg ⁻¹	0,64	0,52	0,04	8,21	148,0	18,09	4,10	*
Fe, mg.kg ⁻¹	58,67	40,06	3,25	197,15	81,0	1,99	1,65	*
Mn, mg.kg ⁻¹	1,48	1,39	0,12	4,27	67,0	0,72	1,08	*
Zn, mg.kg ⁻¹	4,60	2,26	0,22	24,96	11,0	3,11	1,85	*
B, mg.kg ⁻¹	0,16	0,12	0,12	0,83	79,0	13,74	3,72	*
Rend., kg.ha ⁻¹	910	890,0	380	1500	30,0	-0,84	0,27	N
Merma, %	18,72	18,65	15,80	21,80	5,0	2,16	0,15	N
FR, %	89,62	89,80	86,60	94,0	1,0	3,75	0,81	*

CV: Coeficiente de variación; Ck: Kurtosis; Cs: Asimetría; W: Normalidad; N: Distribución normal; * Distribución no normal.

Fuente: Elaboración propia

El factor de rendimiento (FR) es la diferencia porcentual entre la cantidad de café pergamino seco (cps) y las pérdidas porcentuales por pasilla de mano, pasilla de trilla y café brocado, que para este estudio fueron de 89,62 %. Es importante mencionar que no se realizó la selección del café, para evitar una calidad de grano artificialmente obtenida.

Los atributos pH, Zn, merma y FR presentaron bajo CV, según la escala propuesta por Dalchiavon et al. (2013). El bajo CV en el pH es interpretado por Acevedo et al. (2008) como resultado de la génesis de los suelos y, por lo tanto, es un atributo más estable en el tiempo y en el espacio. Autores como Fu et al. (2010), lo justifican debido a la forma de estimación (conversión logarítmica de la actividad de los protones) e indican que de esta forma no se refleja el comportamiento real del pH, lo que en realidad es mucho más variable.

El CO presentó un CV del 29,0 %, inferior en los reportes para andisoles de Ochoa et al. (2003) y por Obi y Ogunkunle (2009) en oxisoles con bajos contenidos de CO, donde presentan un CV de 57,1 %, pero similares CV a los reportados por Wang et al. (2009) en suelos con bajos contenidos de CO y Wang et al. (2010) en suelos cambisoles, arenosoles y chernozem, lo que denota que la variación de este atributo es independiente del tipo de suelo. Ortega y Santibáñez (2007) afirman que la moderada o alta variación en los contenidos de CO es consecuencia de varios factores como la actividad microbiana, tipo de cultivo, cantidad y calidad de residuos vegetales y de la aplicación de fertilizantes.

El P exhibe un CV de 58 %, variabilidad inferior a la reportada para diferentes profundidades por Cambardella y Karlen (1999) y a la reportada por Roger et al. (2014), cuando evaluaron diferentes usos del suelo, estudio en el cual también se compara el uso de varios extractantes y se obtuvieron diferencias en todos los casos, lo que demuestra que la concentración de este elemento presenta alta variabilidad a diferentes profundidades del suelo y que está condicionada al manejo antrópico, incluso mostrando divergencias según el método que se use para su análisis, como es reportado Sana et al. (2014).

El rendimiento presentó un CV del 30 %, similar al obtenido en café por Molin et al. (2010) en oxisoles, cuando evaluaron los rendimientos en sistemas de manejo convencional y localizado, pero inferior a los reportados en café por Ferraz et al. (2012) en oxisoles con CV del 42,6 % al 66,0 % medido en tres años diferentes.

Los contenidos de Ca, K, Mg, Al, Cu, Fe, Mn y B, se encuentran con alta variabilidad, pues los CV de Ca, K, Mg y Al se encuentran en un rango similar a los encontrados por Sadeghian y Lince (2014) en andisoles de Colombia y Obando et al. (2006) en suelos de la región central andina colombiana, pero superiores a los encontrados por Silva et al. (2008; 2010), en oxisoles de zonas cafeteras del Brasil, debido a que estos normalmente poseen bajos contenidos de bases, situación que hace necesaria su aplicación, práctica que es realizada por los agricultores de forma continua y con dosis homogéneas, lo que causa la variabilidad natural de su concentración.

Análisis de variabilidad espacial

Después de realizar el análisis descriptivo se realizó la estimación de los puntos no muestreados a través del análisis geoestadístico. La tabla 2 muestra los resultados obtenidos en el semivariograma, en el cual se eliminaron valores extremos en K, Na, CICE, Cu, Mn, Zn y FR para evitar que la distribución normal presente colas largas que alteren los resultados en la interpolación krigging (Cressie 1993).

El B es el único atributo con efecto pepita (EP), lo que muestra que su distribución espacial no obedece a un modelo y, por lo tanto, no existe correlación espacial, independientemente de la distancia de muestreo (Obando et al. 2006). Aunque es importante mencionar que el método utilizado no es útil para concentraciones inferiores a 0,12 mg·kg⁻¹, que para este caso representan 50 de las 64 muestras tomadas, por lo que, para suelos pobres en el elemento, se deben considerar otros métodos, además es el único que representa una limitante para la producción a lo largo del terreno y debe ser objeto de manejo.

Los modelos experimentales de mayor ajuste son el gaussiano y el exponencial. Webster y Oliver (2007) afirman que los modelos de semivariograma más frecuentemente encontrados en los estudios de variabilidad espacial de atributos del suelo, son el esférico y el exponencial, resultados que coinciden con los datos generados por Garzón et al. (2010) en andisoles de Colombia y Silva et al. (2008) en estudios realizados en oxisoles en Brasil.

El Na presentó dependencia espacial moderada, que concuerda con los resultados obtenidos por Cortés et al. (2013), pero con mayor dependencia que la obtenida por Camacho-Tamayo et al. (2008) y Obi y Udoh (2011), en los que es posible estimar su contenido gracias a que el alcance en el que se encuentra es inferior a la distancia de muestreo encontrada cuando se alcanza la meseta (Sana et al. 2014).

El carbono orgánico (CO) presenta un muy alto GDE, con un rango de 46,2 m y un coeficiente de determinación (r^2) de 0,80, valores superiores a los

reportados por Dalchiavon et al. (2014) en cultivo de caña en Brasil. La concentración de P se ajusta a un modelo esférico, con un muy alto GDE, un r^2 de 0,86 y un alcance de 12,0 m, que se puede considerar bajo los alcances de los otros atributos medidos, lo que hace necesaria una densidad de muestreo mayor para identificar su variabilidad espacial. En estudios realizados por Sana et al. (2014), se encuentra un ajuste a un modelo esférico con un efecto pepita o con moderado GDE dependientes del método de cuantificación utilizado con un alcance de hasta 102 m. En estudio realizado por Martins et al. (2011), se obtuvieron valores similares a los encontrados en este análisis en r^2 y CVC, pero con un alcance similar al reportado por Sana et al. (2014).

El contenido de bases K, Ca y Mg presentan un muy alto GDE con valores entre 0,80 y 0,89, con alcances entre 114 m a 182 m en donde el Mg presenta el mayor r^2 con 0,93 mientras que el menor lo presenta el K con 0,75, valores superiores a los reportados por Dalchiavon et al. (2013) en los tres atributos, pero con el mismo modelo de semivariograma (gaussiano) para Ca y Mg.

Tabla 2. Parámetros de los modelos de semivariograma

Atributo	Modelo	Pepita	Meseta	Rango (m)	GDE	r^2	CVC
pH	Gaussiano	0,08	0,90	236,08	0,91	0,85	1,07
CO	Esférico	0,77	2,05	55,30	0,63	0,91	1,00
Ca	Esférico	2,20	16,99	148,20	0,87	0,81	1,07
K	Gaussiano	0,02	0,15	212,70	0,87	0,82	1,04
Mg	Gaussiano	0,22	1,11	129,38	0,80	0,97	1,04
Na	Exponencial	6×10^{-6}	$1,5 \times 10^{-4}$	69,90	0,61	0,76	0,57
Al	Gaussiano	3,60	13,21	118,99	0,73	0,91	0,99
CICE	Gaussiano	5,39	11,12	80,36	0,51	0,81	1,09
P	Esférico	0,10	279,90	12,0	1,00	0,73	0,86
Cu	Esférico	1×10^{-4}	0,06	10,7	0,99	0,67	0,45

(Continúa)

(Continuación tabla 2)

Atributo	Modelo	Pepita	Meseta	Rango (m)	GDE	r ²	CVC
Fe	Exponencial	532,00	1.643,00	35,7	0,68	0,41	0,62
Zn	Exponencial	2,16	14,00	102,90	0,85	0,69	1,01
B	EP	0,02	0,02	7,00	1,00	0,46	-0,14
Rendimiento	Gaussiano	4.100	91.500,00	30,81	0,96	0,88	1,02
Merma	Exponencial	0,57	1,88	498,60	0,70	0,29	0,97
FR	Exponencial	0,04	0,69	38,40	0,95	0,69	0,89

GDE: Grado de dependencia espacial; r²: Coeficiente de determinación del modelo; CVC: Coeficiente de determinación de la validación cruzada.

Fuente: Elaboración propia

Los micronutrientes Fe y Mn presentan alto GDE, Cu muy alto GDE, alcances inferiores a 37 m, r² iguales o inferiores a 0,52 y coeficientes validación cruzada (CVC) inferiores a 0,67, lo que muestra alta variabilidad espacial para estos atributos. Por otra parte, el Zn presenta el mayor r², alcance y CVC. Estudios de Wang et al. (2008) y Wang et al. (2009), muestran bajo GDE para todos los microelementos, alcances mayores y r² inferior para todos los casos, debido a los bajos contenidos de estos en el suelo.

Correlaciones lineales

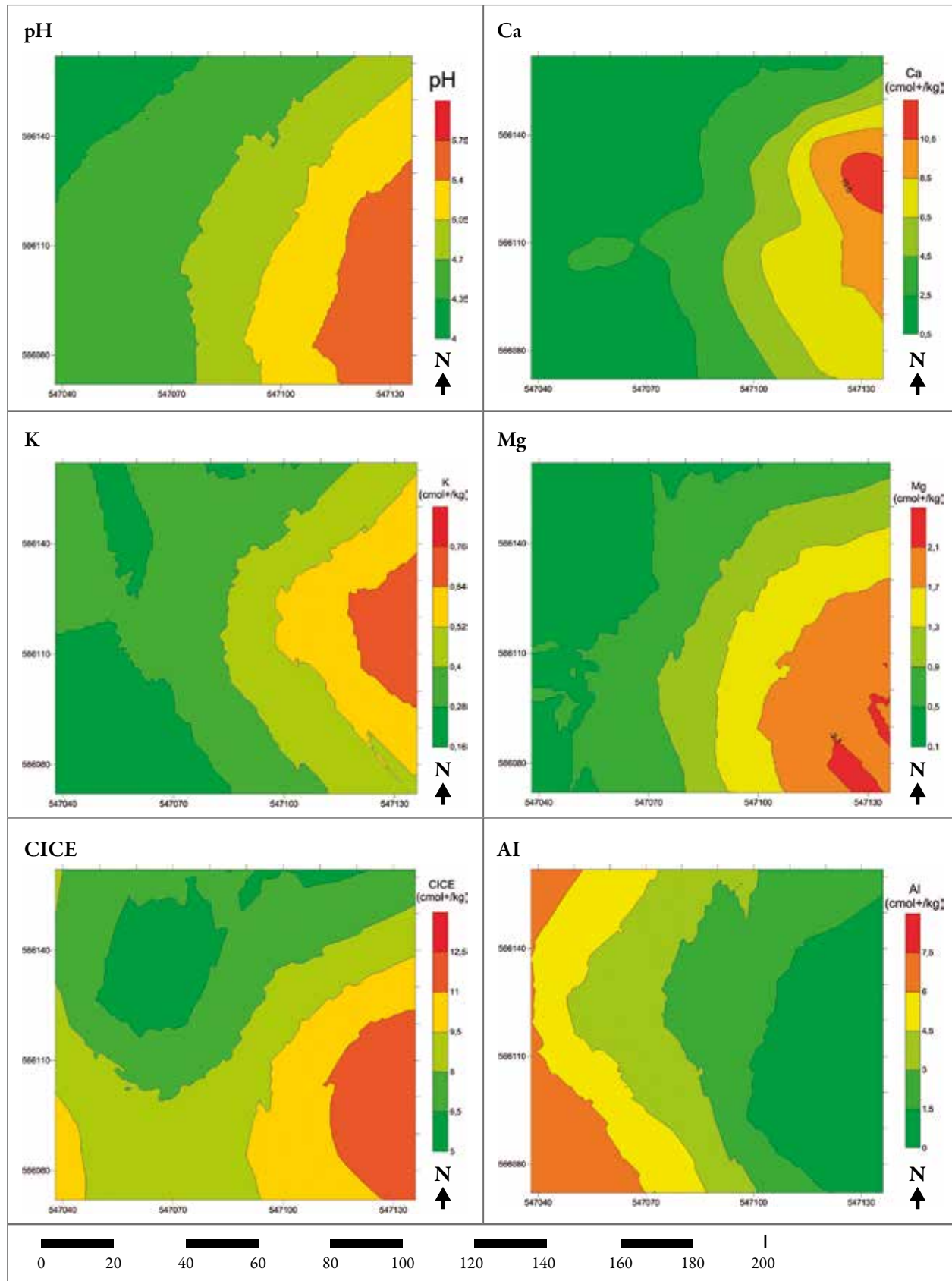
El pH presenta correlación positiva con las bases de cambio Ca, K y Mg y negativa con el contenido de Al (figura 1), ya que la pérdida de bases genera en el suelo mayor disponibilidad de este elemento. Esta alta correlación se ve reflejada también en el comportamiento que presentan el pH, el Al y las bases en la distribución espacial que se muestra en los mapas de contorno, donde se verifica que zonas con alto pH, corresponden a zonas de bajo contenido de Al y alta presencia de bases.

De igual forma, incrementos en el pH favorecen la disponibilidad de P (figura 1), ya que se disminuye

la cantidad de Al que forman precipitados insolubles con el elemento. En el caso de los microelementos, se presenta una correlación positiva con Cu, Fe y Zn, en la que este último muestra la mayor correlación, además de ser el elemento que más se beneficia con incrementos en el pH como se observa en las correlaciones del Fe y P respecto al Zn.

El rango en el que está el pH y la concentración media de Al son considerados limitantes para el desarrollo de las plantas, pero no se encuentra ninguna correlación de estos con el rendimiento, lo que concuerda con estudios realizados por Ortiz et al. (2004) en andisoles de Colombia, en los cuales se concluye que, incluso a concentraciones superiores de 20 cmol+·kg⁻¹ de Al, no se presenta toxicidad, ni se afecta la zona radical de las plantas, posiblemente a que ninguna de las formas del Al son tóxicas para el cultivo.

El pH, Ca y Zn mostraron correlación negativa con la merma, mientras niveles altos de Al mostraron una correlación positiva, lo que indica que la acidez del suelo incrementa las pérdidas en el cultivo de café.



Variedad espacial de los atributos químicos del suelo en el rendimiento y calidad de café

Figura 1. Mapas de contorno para los atributos de suelo y rendimiento.
Fuente: Elaboración propia

(Continúa)

(Continuación figura 1)

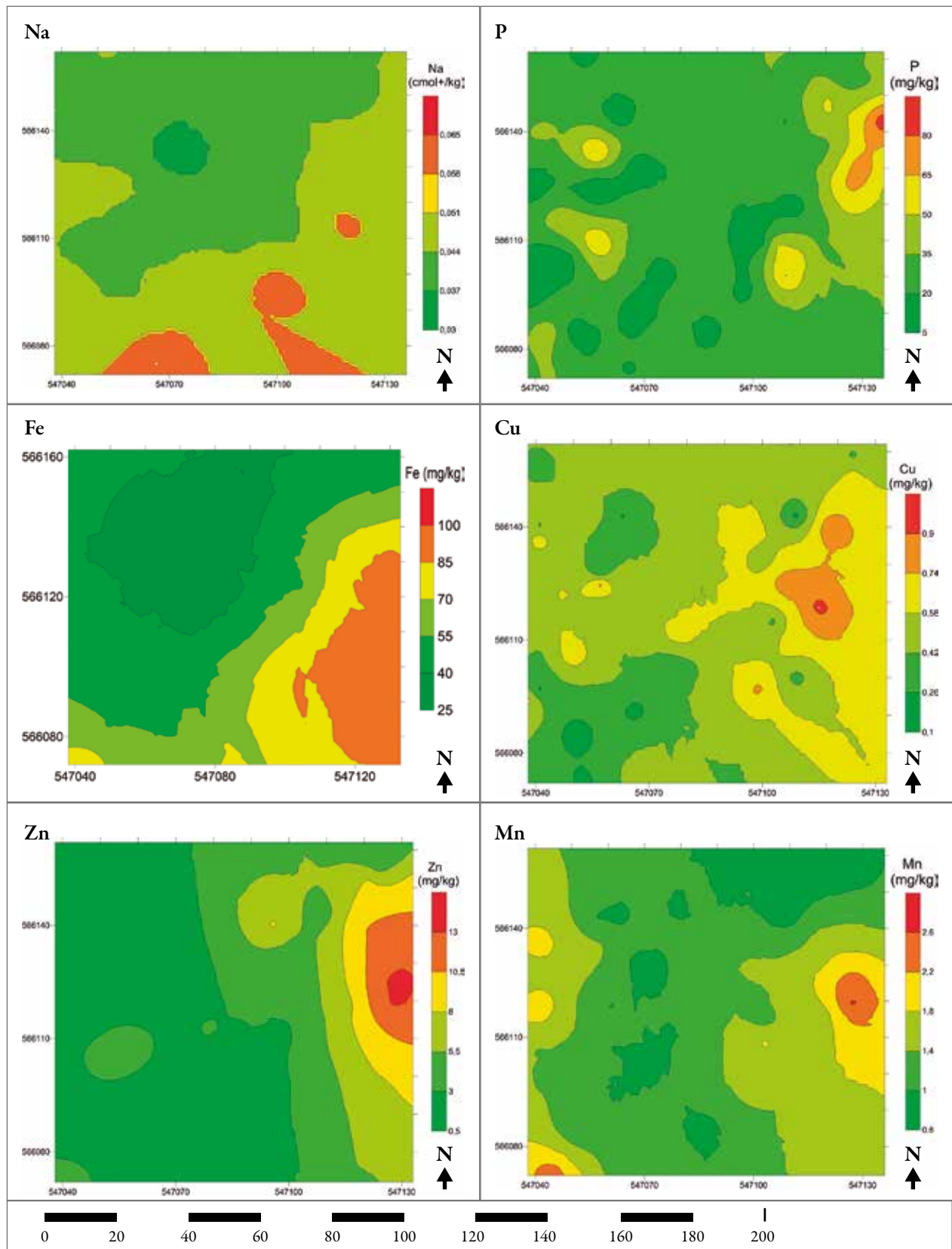


Figura 1. Mapas de contorno para los atributos de suelo y rendimiento.

Fuente: Elaboración propia

Variabilidad espacial de los atributos químicos del suelo en el rendimiento y calidad de café

El contenido de CO afecta negativamente la concentración de Fe y Al en el suelo, debido a la formación de complejos, contrastante a resultados reportados por Ortiz et al. (2006) quienes determinaron que en andisoles la materia orgánica del suelo no forma complejos con el Al y, por lo tanto, no se afecta el rendimiento del cultivo. También se verifica la correlación negativa entre la concentración de CO y la CICE del suelo (tabla 3), opuesto al comportamiento esperado en esta relación. Esto puede ser causado por una MO rica en cargas positivas,

que compiten con las bases en el suelo, ya que no se obtiene correlación entre la CICE y el Al.

El CO es el único atributo que presenta influencia sobre el rendimiento, con una correlación de 0,36, igual a resultados obtenidos por Dalchiavon et al. (2013; 2014) en caña de azúcar en Brasil, estudios en los que resalta la importancia de un manejo adecuado y sostenible de este atributo en el suelo, pues el CO modifica características físicas, químicas y biológicas del suelo, que benefician el desarrollo de los cultivos.

Tabla 3. Correlaciones lineales significativas de los atributos químicos del suelo y parámetros de rendimiento del café

Atributo	Atributo con correlación (r^2) significativa
pH	Ca (0,88), K (0,59), Mg (0,76), Al (-0,76), CICE (0,46), P (0,30), Cu (0,53), Fe (0,38), Zn (0,61), merma (0,36)
CO	Al (-0,40), CICE (-0,56), Fe (-0,40), rendimiento (0,35)
Ca	pH (0,88), K (0,51), Mg (0,78), Al (-0,64), CICE (0,69), P (0,50), Cu (0,67), Fe (0,50), Zn (0,75), merma (0,41)
K	pH (0,59), Ca (0,51), Mg (0,61), Al (-0,45), CICE (0,39), P (0,38)
Mg	pH (0,76), Ca (0,78), K (0,61), CICE (0,63), Fe (0,38), Zn (0,43)
Al	pH (-0,76), CO (-0,40), Ca (-0,63), K (-0,45), Mg (-0,55), Zn (-0,51), merma (0,36)
CICE	pH (0,46), CO (-0,56), Ca (0,69), K (0,39), Mg (0,63), Cu (0,47), Fe (0,62), Mn (0,45), Zn (0,42)
P	pH (0,36), Ca (0,50), K (0,37), Cu (0,62), Fe (0,45), Zn (0,48)
Cu	pH (0,53), Ca (0,67), CICE (0,47), P (0,62), Fe (0,43), Mn (0,37), Zn (0,53)
Fe	pH (0,38), CO (-0,40), Ca (0,50), Mg (0,37), CICE (0,62), P (0,45), Cu (0,43), Mn (0,36), Zn (0,37)
Mn	CICE (0,45), Cu (0,37), Fe (0,36)
Zn	pH (0,62), Ca (0,75), Mg (0,43), Al (-0,51), CICE (0,43), P (0,48), Cu (0,53), Fe (0,37), merma (-0,35)
Rendimiento	CO (0,36)
Merma	pH (-0,37), Ca (-0,41), Al (-0,36), Zn (-0,35), FR (0,65)
FR	Merma (0,65)

Fuente: Elaboración propia

Análisis de componentes principales

De los 14 atributos de suelo y 3 de cultivo fueron seleccionados 5 componentes principales, los cuales presentan un autovalor superior a 1 y que, en conjunto, explican el 72,99% de la varianza total. Considerando los cuatro primeros CP, que explican el 66,04% de la variación de los datos (tabla 4), se observa que los atributos con mayor influencia en el CP1 son pH y Ca, lo cual se confirma con los valores superiores al 0,92 de la comunalidad. La pareja Na y B presentan valores de comunalidad inferiores o cercanos a 0,5, lo que indica que estos atributos son pocos representativos, considerando las características del suelo.

El Mn presenta un valor de comunalidad superior a 0,68, pero, como atributo, se concluye que es representativo en los CP analizados. El rendimiento presenta un valor significativo en el CP4, con una

comunalidad superior al 0,70 pero en un componente que solo explica el 7,51% de la variación total de los datos.

El primer componente principal representa el 34,12% de la varianza total, que agrupa la mayoría de los atributos representativos del suelo para el presente estudio. El CP2 agrupa los atributos CO y Al, mientras que los CP3 y CP4 contienen los atributos de rendimiento, lo que muestra el bajo peso que se encontró entre los atributos medidos y el rendimiento del cultivo.

Se observa una relación negativa entre el contenido de CO con los contenidos de Fe, Mn y la CICE del suelo, además de ser el único atributo con influencia sobre el rendimiento. Mientras que, al incrementarse el contenido de Ca o con mayores valores del pH, se observó que disminuye la merma.

Tabla 4. Coeficientes de cuatro primeros componentes principales, de los atributos del suelo y parámetros productivos del café

Atributo	CP1	CP2	CP3	CP4	Comunalidad
pH	-0,8651	0,2971	-0,1277	-0,1375	0,9203
CO	0,2390	0,7626	0,3501	0,1638	0,8534
Ca	-0,9581	0,1156	-0,0129	0,0100	0,9327
K	-0,5792	0,3434	-0,3738	0,1405	0,6167
Mg	-0,7776	0,2023	-0,2085	0,3027	0,8613
Na	-0,2610	-0,4170	0,1049	0,0046	0,3399
Al	0,5780	-0,7315	-0,0956	0,1334	0,8986
CICE	-0,7139	-0,4705	-0,2119	0,2377	0,8379
P	-0,6118	0,0203	0,1912	-0,1075	0,7321

(Continúa)

(Continuación tabla 4)

Atributo	CP1	CP2	CP3	CP4	Comunalidad
Cu	-0,7054	-0,1631	0,1990	-0,1384	0,7167
Fe	-0,6355	-0,4505	-0,0253	0,0596	0,6139
Mn	-0,4149	-0,3704	-0,0027	0,4892	0,6891
Zn	-0,7511	0,0678	0,0937	-0,2961	0,6841
B	0,0921	0,0591	0,2120	0,1777	0,1959
Rendimiento	0,1278	0,3617	-0,0434	0,7720	0,7459
Merma	0,4346	-0,0774	-0,7501	0,0247	0,8939
FR	0,0372	0,2711	-0,8410	-0,2338	0,8750
Autovalor	5,8033	2,3585	1,7899	1,2760	
Varianza, %	34,14	13,87	10,53	7,51	
Varianza acumulada, %	34,14	48,01	58,54	66,04	

Nota: Valores > 0,7 (valor absoluto) aparecen en negrilla
Fuente: Elaboración propia

Análisis de agrupamiento jerárquico

Para identificar semejanza entre variables y puntos de muestreo se realizó un análisis de agrupamiento jerárquico, en el cual se utilizó el algoritmo de Ward. Este análisis considera que la medida de disimilitud es una distancia entre atributos (Kaiser y Rice 1974), considerando la distancia euclidiana en este estudio.

Al estimar los atributos y variables productivas, se definieron dos grupos (figura 2). En el primer grupo se encuentran las bases del suelo y micronutrientes, mientras que las variables de rendimiento conforman el segundo grupo, junto con los contenidos de CO

y Al. Estos resultados reafirman que el CO evidentemente sí influye en la producción y calidad del café, en la zona de estudio. De igual manera, al encontrarse los micronutrientes y bases en otro grupo, también se verifica la poca incidencia de estos atributos en las variables de producción analizadas.

Los resultados del análisis de agrupamiento para puntos, también permite definir dos áreas (figura 3). Estas áreas se pueden delimitar como zonas de manejo por la similitud que presentan los puntos. A partir de estas, se pueden generar recomendaciones que, en nuestro caso, se realizaron considerando la media de cada atributo por grupo (tabla 5).

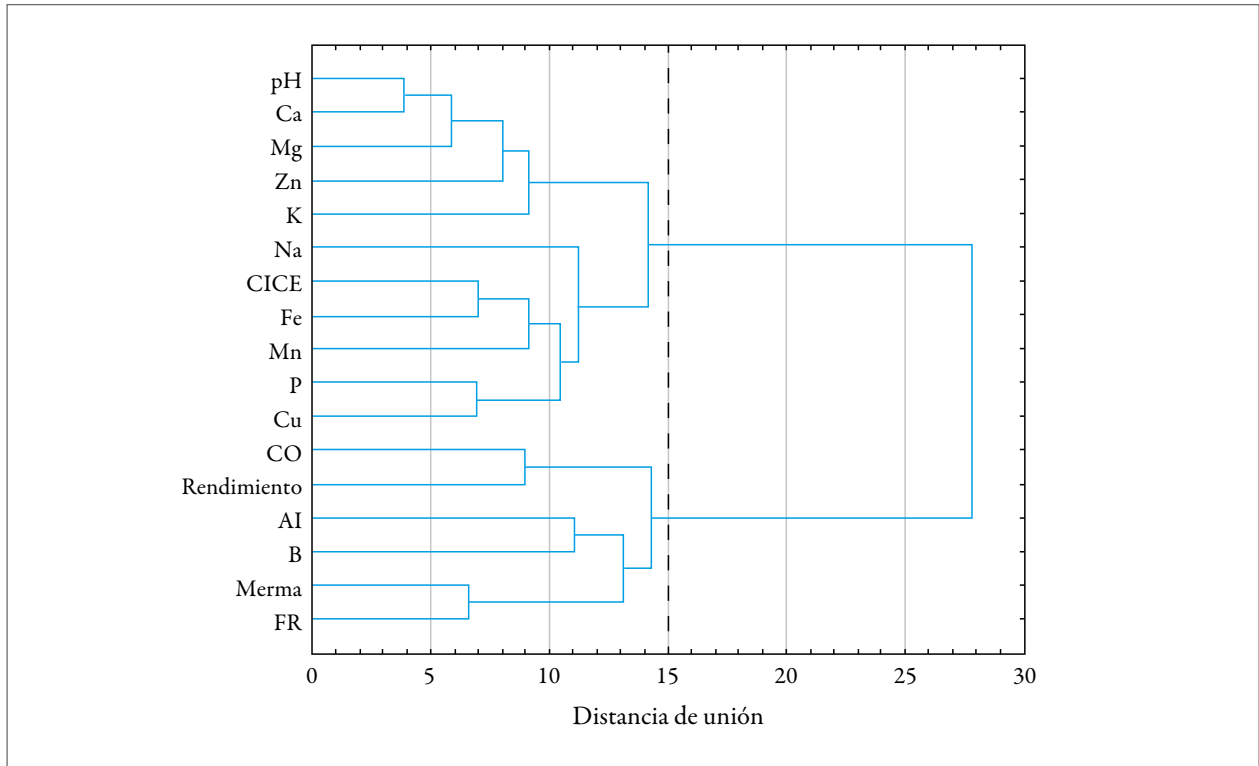


Figura 2. Dendrograma resultante del análisis jerárquico de los atributos químicos del suelo.

Fuente: Elaboración propia

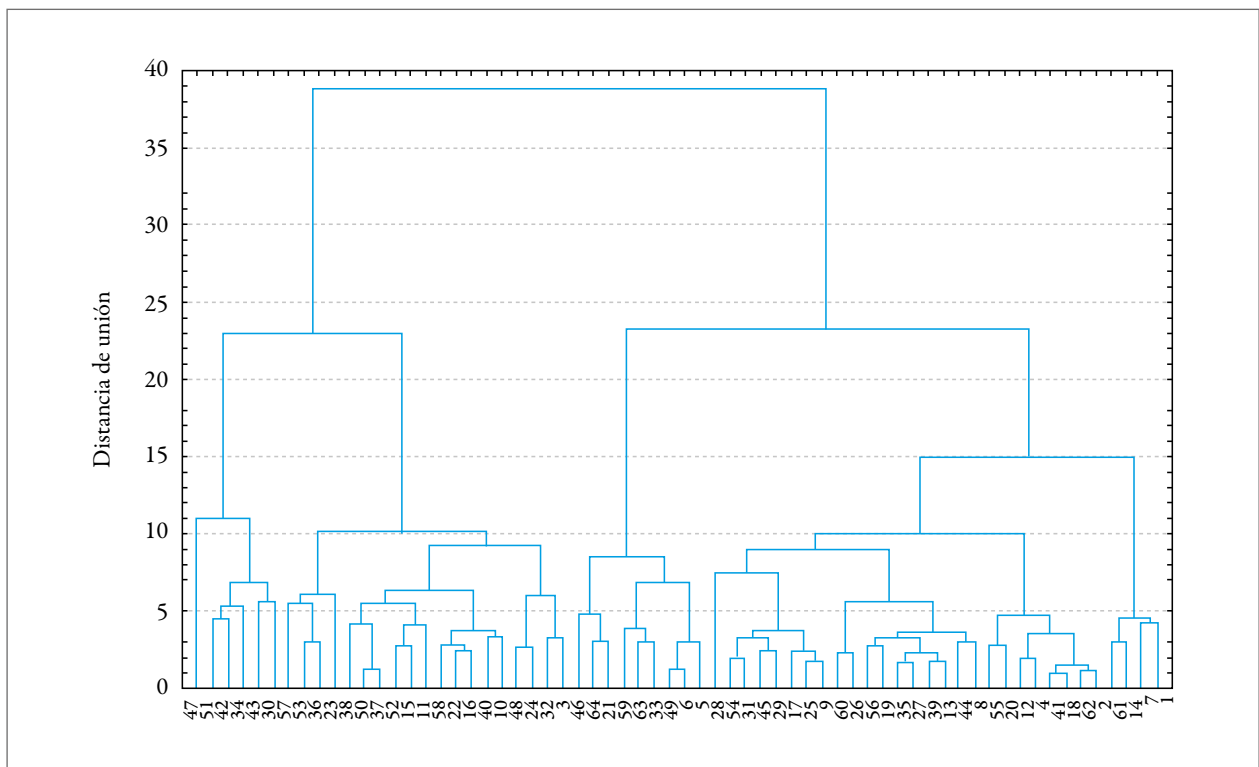


Figura 3. Dendrograma resultante del análisis de agrupamiento jerárquico por puntos de muestreo.

Fuente: Elaboración propia

Al analizar las zonas propuestas, se observa una disminución en el CV de los atributos pH, Ca, K, Mg, CICE, Cu, B, merma y FR. Los otros atributos presentaron un incremento del CV. El pH, merma y FR presentan baja variabilidad después del agrupamiento, mientras que los atributos Fe, Cu y Zn presentan alta variabilidad; para el resto de atributos esta es considerada media, que, visto desde el punto de vista del manejo del café, sería adecuado, pues, como se mencionó anteriormente, las deficiencias en elementos menores son inusuales y fácilmente corregibles con aplicaciones puntuales en las zonas que demuestran la deficiencia.

La característica de alta variabilidad para los atributos químicos se mantiene, ya que, después del agrupamiento, se encuentran valores superiores a 0,70 en el CV. Sin embargo, se presenta disminución para la mayoría de ellos, por lo que se considera que el

agrupamiento fue adecuado y es posible realizar manejos específicos para cada zona establecida a partir del agrupamiento jerárquico.

El grupo 1 posee mayores contenidos de nutrientes que el grupo 2, por lo que se aprecia mayor rendimiento en esta zona, con una producción estimada de 2.353,0 kg·ha⁻¹·año⁻¹, mientras que el rendimiento estimado para la zona 2 fue de 2.225,63 kg·ha⁻¹·año⁻¹, ambos por debajo del rendimiento máximo económico y biológico de 6.025 kg·ha⁻¹ (Duque-Orrego y Mestre-Mestre 2001).

Las zonas de manejo (figura 4) denotan una clara distribución espacial, pero dada la poca diferencia que se obtiene en el rendimiento, el manejo para ellas no justifica mayores discriminaciones como incrementos en las cantidades de fertilizantes en la parte norte del terreno o noreste del mapa.

Tabla 5. Estadística descriptiva grupos 1 y 2

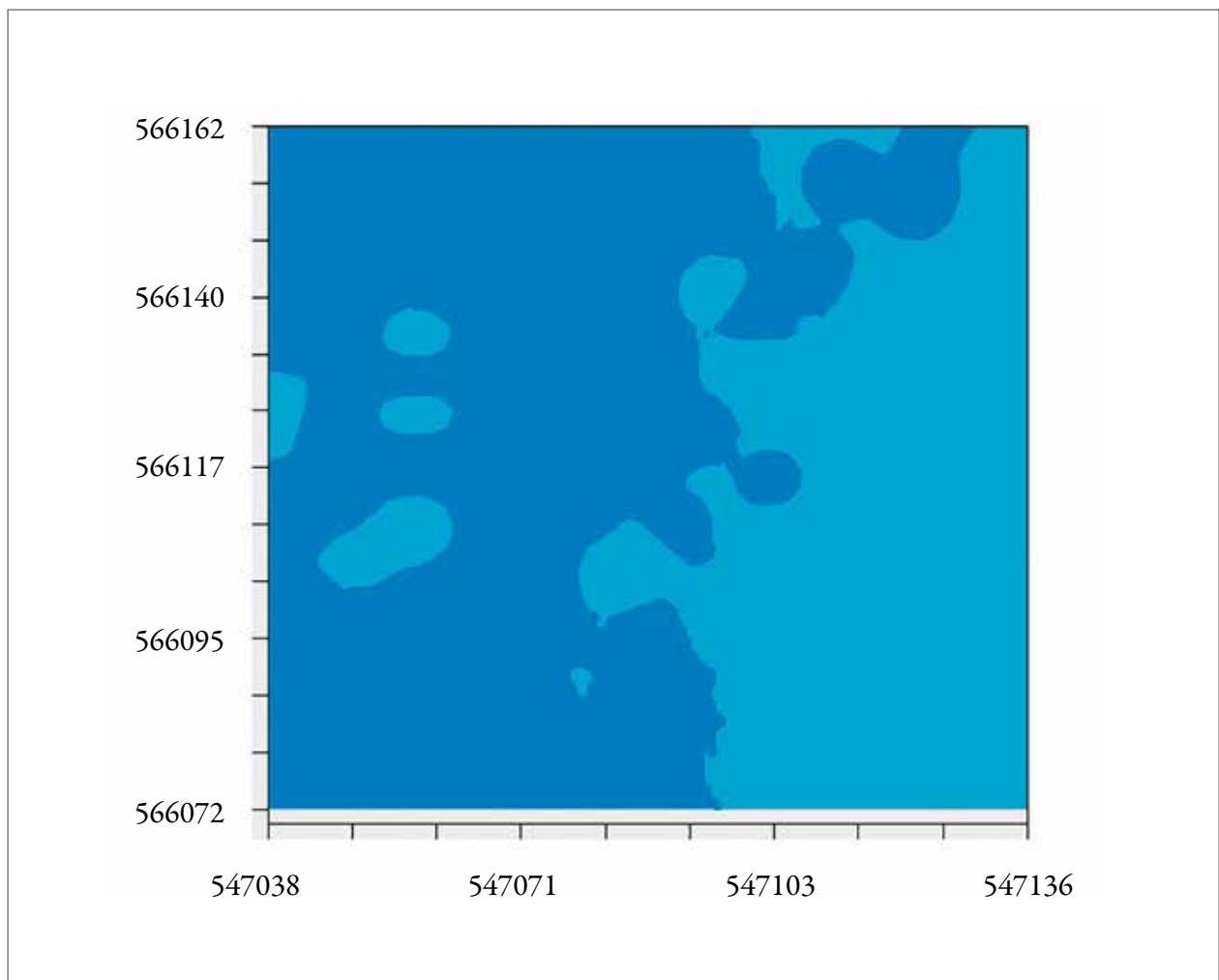
Atributo	Grupo 1		Grupo 2	
	Media	CV	Media	CV
pH	5,14	0,08	4,47	0,06
CO	5,56	0,19	5,76	0,34
Ca	6,38	0,51	1,72	0,64
K	0,74	0,83	0,28	0,37
Mg	1,69	0,55	0,46	0,56
Na	0,05	0,26	0,04	0,27
Al	1,18	0,94	4,97	0,57
CICE	10,04	0,32	7,49	0,36
P	38,46	0,58	24,75	0,42
Cu	1,48	1,26	0,46	0,62
Fe	78,40	0,66	46,02	0,89

(Continúa)

(Continuación tabla 5)

Atributo	Grupo 1		Grupo 2	
	Media	CV	Media	CV
Mn	1,93	0,54	1,19	0,71
Zn	8,45	0,74	2,12	0,93
B	0,14	0,27	0,17	0,91
Rendimiento	941,2	0,27	890,25	0,32
Merma	18,28	0,05	19,00	0,04
FR	89,55	0,01	89,67	0,01

Fuente: Elaboración propia

**Figura 4.** Zonas de manejo definidas a partir del análisis jerárquico.

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

El método de las correlaciones lineales y el método de agrupamiento tienen resultados similares, pero no permiten una verdadera correlación entre los atributos, como sí lo hace el análisis de componentes principales, en el cual no solo se determinan relaciones entre pares de atributos, sino que permite el agrupamiento de estos y su jerarquización.

Los métodos de análisis espacial y de agrupamiento permiten generar zonas de similares características, lo que supone una disminución en la variación de los datos en el terreno y así produce un uso más eficiente de los recursos. Con base en estas herramientas se puede precisar dos situaciones: la primera,

realizar un muestreo numeroso por unidad de área es costoso o no es económicamente viable para muchos agricultores; sin embargo, una segunda situación, en la que se mantenga el número de muestras por unidad de área, puede implicar la pérdida de información, para atributos con alta variabilidad espacial, que inciden en la producción.

Descargos de responsabilidad

La presente investigación y el manuscrito fueron realizados y revisados con la participación de todos los autores, quienes declaran que no existe ningún conflicto de intereses que ponga en riesgo la validez de los datos obtenidos o los resultados presentados.

Referencias

- Acevedo C, Álvarez ME, Hernández E, Maldonado R, Pérez M, Castro R. 2008. Variabilidad espacial de las propiedades químicas del suelo y su uso en el diseño de experimentos. *Terra Latinoamericana*. 26(4):317-324.
- Alvarado G, Posada HE, Cortina HA, Duque H, Baldión JV, Guzmán O. 2005. La variedad Castillo Santa Bárbara para las regiones cafeteras de Cundinamarca y Boyacá. Avance técnico 342. Chinchiná, Colombia: Cenicafé.
- Camacho-Tamayo JH, Luengas CA, Leiva FR. 2008. Effect of agricultural intervention on the spatial variability of some soils chemical properties in the eastern plains of Colombia. *Chil J Agr Res*. 68(1):42-55.
- Camacho-Tamayo JH, Rubiano Y, Santana LM. 2013. Management units based on the physical properties of an Oxisol. *J Soil Sci Plant Nutr*. 13(4):767-785.
- Cambardella CA, Karlen DL. 1999. Spatial analysis of soil fertility parameters. *Precis Agric*. 1(1):5-14.
- Cortés DL, Pérez JH, Camacho-Tamayo JH. 2013. Relación espacial entre la conductividad eléctrica y algunas propiedades químicas del suelo. *Rev UDCA Act & Div Cient*. 16(2):401-408.
- Couto EG, Stein A, Klamt E. 1997. Large area spatial variability of soil chemical properties in central Brazil. *Agric Ecosyst Environ*. 66(2):139-152.
- Cressie N. 1993. *Statistics for spatial data*. Revised Edition. Nueva York: John Wiley & Sons.
- Dalchiavon FC, Carvalho MP, Montari R, Andreotti M. 2013. Sugarcane productivity correlated with physical-chemical attributes to create soil management zone. *Rev Ceres*. 60(5):706-714.
- Dalchiavon FC, Carvalho MP, Montari R, Andreotti M, Bem EAD. 2014. Inter-relações da produtividade de cana soca com a resistência à penetração, umidade e matéria orgânica do solo. *Rev Ceres*. 61(2):255-264.
- Duque-Orrego H, Mestre-Mestre A. 2001. Óptimos biológico y económico de la respuesta del café a la fertilización en dos localidades de Colombia. *Cenicafé*. 52(1):74-89.
- Ferraz GAS, Silva FM, Alves MC, Bueno RL, Costa PAN. 2012. Geostatistical analysis of fruit yield and detachment force in coffee. *Precision Agric*. 13(1):76-89.
- Fu W, Tunney H, Zhang C. 2010. Spatial variation of soil nutrients in a dairy farm and its implications for site-specific fertilizer application. *Soil Tillage Res*. 106(2):185-193.
- Garzón CA, Cortés CA, Camacho-Tamayo JH. 2010. Variabilidad espacial de algunas propiedades químicas en un entisol. *Rev UDCA Act & Div Cient*. 13(1):87-95.
- Huang B, Sun W, Zhao Y, Zhu J, Yang R, Zou Z, Ding F, Su J. 2007. Temporal and spatial variability of soil organic matter and total nitrogen in an agricultural ecosystem as affected by farming practices. *Geoderma*. 139(3-4):336-345.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 1995. *Suelos de Colombia*. Bogotá, Colombia: IGAC.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2000a. *Consideraciones generales para interpretar análisis de suelos*. Subdirección de agrología. Bogotá, Colombia: IGAC.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi. 2000b. *Estudio General de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca*. Bogotá, Colombia: IGAC.
- Jaramillo DF. 2009. Variabilidad espacial de las propiedades ándicas de un andisol hidromórfico del oriente antioqueño (Colombia). *Rev Fac Nal Agr*. 62(1):4907-4921.

- Kaiser HF, Rice J. 1974. Little Jiffy Mark IV. *Educ Psychol Meas.* 34(1):111-117.
- Lis-Gutiérrez JP, Herrera JP, Campo JA. 2012. Estudio sobre el sector del café en Colombia. Bogotá, Colombia: Superintendencia de Industria y Comercio.
- Martins AL, Moura EG, Camacho-Tamayo JH. 2011. Evaluation of corn production parameters and their spatial relationship with chemical attributes of the soil. *Agron Colomb.* 29(1):99-106.
- Mestre A, Ospina HF. 1994. Manejo de los cafetales para estabilizar la producción en las fincas cafeteras. *Avances técnicos* 201. Chinchiná, Colombia: Cenicafé.
- Molin JP, Motomiya AVA, Frasson FR, Faulin GC, Tosta W. 2010. Test procedure for variable rate fertilizer on coffee. *Acta Sci Agron.* 32(4):569-575.
- Montilla J, Arcila J, Aristizábal M, Montoya EC, Puerta GI, Oliveros CE, Cadena G. 2008. Propiedades físicas y factores de conversión del café en el proceso del beneficio. *Avances técnicos* 370. Chinchiná, Colombia: Cenicafé.
- Obando FH, Villegas AM, Betancour JH, Echeverry L. 2006. Variabilidad espacial de propiedades químicas y físicas en un *Typic Udivitrands*, arenoso de la región andina central colombiana. *Rev Fac Nal Agr. Medellín.* 59(1):3217-3235.
- Obi JC, Ogunkunle AO. 2009. Influence of termite infestation on the spatial variability of soil properties in the Guinea savanna region of Nigeria. *Geoderma.* 148(3-4):357-363.
- Obi JC, Udoh BT. 2011. Identification of soil management factors from spatially variable soil properties of Coastal Plain Sand in Southeastern Nigeria. *Open Journal of Soil Science* 1(2):25-39.
- Ochoa WA, Suárez S, Sadeghian S. 2003. Variabilidad espacial del nitrógeno disponible en andisoles de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé.* 54(2):179-189-203.
- Oliveira RB, Lima JSS, Xavier AC, Passos RR, Silva SA, Silva AF. 2008. Comparação entre métodos de amostragem do solo para recomendação de calagem e adubação do cafeeiro conilon. *Eng Agríc.* 28(1):176-186.
- Ortega RA, Santibáñez OA. 2007. Determination of management zones in corn (*Zea mays* L.) based on soil fertility. *Comput Electron Agric.* 58(1):49-59.
- Ortiz ME, Zapata RD, Sadeghian S, Franco HF. 2004. Aluminio intercambiable en suelos con propiedades ándicas y su relación con la toxicidad. *Cenicafé.* 55(2):101-110.
- Ortiz ME, Zapata RD, Sadeghian S. 2006. Propiedades de la materia orgánica y capacidad complejante sobre el aluminio en algunos suelos ándicos en Colombia. *Cenicafé.* 57(1):51-57.
- Roger A, Libohova Z, Rossier N, Joost S, Maltas A, Frossard E, Sinaj S. 2014. Spatial variability of soil phosphorus in the Fribourg canton, Switzerland. *Geoderma.* 217-218:26-36.
- Sadeghian S. 2010. Fertilización: Una práctica que determina la producción en los cafetales. *Avances Técnicos* 391. Chinchiná, Colombia: Cenicafé.
- Sadeghian S, Lince LA. 2014. Variabilidad del suelo en lotes cafeteros. Consideraciones para el muestreo. *Avances técnicos* 446. Chinchiná, Colombia: Cenicafé.
- Sana RS, Anghinoni I, Brandao ZN, Holzschuh MJ. 2014. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo e seus efeitos na produtividade do algodoeiro. *Rev Bras Eng Agríc Ambient.* 18(10):994-1002.
- Silva FM, Sousa ZM, Figueiredo CAP, Sousa LHS, Oliveira E. 2008. Variabilidade espacial de atributos químicos e produtividade da cultura do café em duas safras agrícolas. *Ciênc Agrotec.* 32(1):231-241.
- Silva SA, Lima JSS, Souza GS. 2010. Estudo da fertilidade de um Latossolo Vermelho-Amarelo húmico sob cultivo de café arábica por meio de geoestatística. *Rev Ceres* 57(4):560-567.
- Varangis P, Giovannucci D, Lewin B, Swinkels R. 2004. Reporte del sector cafetero. República socialista de Vietnam. *Ensayos sobre economía cafetera.* 18(21):63-140.
- Wang SY, Yu TQ, Wang JL, Yang L, Yang K, Lu P. 2008. Preliminary study on spatial variability and distribution of soil available microelements in Pinggu County, Beijing, China. *Agric Sci China.* 7(10):1235-1244.
- Wang L, Wu JP, Liu YX, Huang HQ, Fang QF. 2009a. Spatial variability of micronutrients in rice grain and paddy soil. *Pedosphere.* 19(6):748-755.
- Wang Y, Zhang X, Huang C. 2009a. Spatial variability of soil total nitrogen and soil total phosphorus under different land uses in a small watershed on the Loess Plateau, China. *Geoderma.* 150(1-2):141-149.
- Wang ZM, Zhang B, Song KS, Liu DW, Ren CY. 2010. Spatial variability of soil organic carbon under maize monoculture in the Song-Nen Plain, Northeast China. *Pedosphere.* 20(1):80-89.
- Warrick AW, Nielsen DR. 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. En: Hileel D, editor. *Applications of soil physics.* Nueva York: Academic Press. pp. 319-344.
- Webster R, Oliver MA. 2007. *Geostatistics for environmental scientists.* 2 ed. New Jersey, EE. UU.:Wiley.
- Weijun F, Tunney H, Zhang C. 2010. Spatial variation of soils nutrients in a dairy farm and its implications for site-specific fertilizer application. *Soil Till Res.* 106(2): 185-193.
- Zhao Y, Peth S, Krümmelbein J, Horn R, Wang Z, Steffens M, Hoffmann C, Peng X. 2007. Spatial variability of soil properties affected by grazing intensity in Inner Mongolia grassland. *Ecol Model.* 205(1-2):241-254.