



Definición de zonas de manejo específico con base en propiedades físicas y químicas del suelo y variables morfométricas del cultivo

Definition of specific management areas based on soil physical and chemical properties and morphometric variables of the crop

Deyanira Lobo L.¹, Juan Carlos Rey B.², Ana P. Carpio J.³,

Emileydi Namias H.⁴; Ángel Valera⁵

Resumen

Con el propósito de delimitar zonas de manejo específico con base en propiedades físicas y químicas de un suelo lacustrino y variables morfométricas del cultivo de banano (*Musa AAA*), se llevó a cabo un estudio en una finca bananera en el estado Aragua, Venezuela, en ocho lotes productivos, correspondientes a 43 ha. Se aplicó un muestreo sistemático con cuadrículas de 150 x 150 m y 70 puntos de muestreo, en los cuales se determinaron: porcentajes de arena, limo, arcilla y fragmentos gruesos; pH; conductividad eléctrica; carbono orgánico; fósforo, calcio, potasio, sodio, magnesio, hierro, manganeso, zinc y cobre disponibles; carbonato de calcio, porosidad total, macroporos, microporos, densidad aparente, conductividad hidráulica saturada y módulo de ruptura. En las plantas, se determinó: la altura, la circunferencia del pseudotallo a un metro de altura, el número de manos por racimo y el peso fresco de raíces totales, funcionales y no funcionales. Se aplicó estadística descriptiva, multivariada y geoestadística para determinar la variabilidad espacial de las variables evaluadas, así como técnicas de inteligencia artificial correspondientes al modelo neuroborroso o de red de agrupamiento borroso de Kohonen (FKCN). Este permitió agrupar los suelos en cinco zonas de manejo específico según sus propiedades físicas y cuatro zonas según sus propiedades químicas. El mayor vigor y la menor producción de raíces totales se obtuvieron en los suelos que presentaron proporciones similares de fracciones granulométricas, los menores contenidos de fósforo y calcio, y los mayores niveles de potasio, magnesio y hierro disponibles. El vigor más bajo y la mayor producción de raíces totales se evidenciaron en los suelos más pesados y en aquellos con predominio de fragmentos gruesos.

Palabras clave: variabilidad espacial, banano Cavendish, suelo lacustrino.

1. Doctor en Ciencia del Suelo. Universidad Central de Venezuela. Correo: lobo.deyanira@gmail.com.

2. MSc en Ciencias del Suelo. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, Universidad Central de Venezuela. Correo: jcreyb@hotmail.com.

3. Ing. Agrónomo. Universidad Central de Venezuela. Correo: ana_patricia_19@hotmail.com.

4. Ing. Agrónomo. Universidad Central de Venezuela. Correo: emi26901@gmail.com.

5. Doctor en Ciencia del Suelo. Universidad Nacional Experimental Rómulo Gallegos. Correo: valeraangel2@gmail.com.





Abstract

With the purpose of delimiting specific management areas based on physical and chemical properties of a lacustrine soil and morphometric variables of the banana crop (Musa AAA), a study was carried out in a banana plantation in Aragua state, Venezuela, in eight production lots corresponding to 43 ha. A systematic sampling with 150 x 150 m grids was applied, resulting in 70 sampling points, in which were determined: percentages of sand, silt, clay and coarse fragments; pH; electric conductivity; organic carbon; phosphorus, calcium, potassium, sodium, magnesium, iron, manganese, zinc and copper available; calcium carbonate, total porosity, macropores, micropores, bulk density, saturated hydraulic conductivity and rupture modulus. In the plants were determined: stem circumference at 1 m, height, number of hands per bunch, fresh weight of total roots, functional and nonfunctional roots. Descriptive, multivariate statistics and geostatistical were applied to determine the spatial variability of the variables, as well as the neuro-fuzzy model FKCN. This allowed grouping the soils into five specific management zones for physical properties and four zones for chemical properties. The highest vigor and the lowest production of total roots were obtained in soils with similar proportions of particles size fractions, and with the lowest available phosphorus and calcium contents, but with the highest levels of available potassium, magnesium and iron. The lowest vigor and the highest total root production were evidenced in the heaviest soils and in those with a predominance of coarse fragments.

Keywords: *spatial variability, Cavendish banana, lacustrine soil.*





Introducción

El comercio internacional de banano se basa en la exportación de frutas de clones del subgrupo Cavendish, que sustituyeron al clon Gros Michel por mostrar resistencia a la enfermedad denominada “mal de Panamá” y una mayor productividad, que alcanza las 60 t/ha, lo cual representa el 47% de la producción mundial de banano. América Latina constituye la primera región en producción de bananos de este grupo, donde se destacan Ecuador, Colombia y Costa Rica como principales países productores y exportadores (Food Agriculture Organization [FAO], 2004).

En Venezuela, la producción de frutales se encuentra en el tercer lugar dentro del sector agrícola vegetal, luego de la producción de caña de azúcar y cereales. El banano representa a uno de los primeros cuatro cultivos con mejores índices de producción por superficie cosechada, volumen y valor (Confederación de Asociaciones de Productores Agropecuarios [Fedeaagro], 2013).

El detrimento en la producción del cultivo en Venezuela puede atribuirse, de manera general, a factores económicos, problemas sanitarios en las plantaciones y eventos climáticos (Martínez, 2009). Al mismo tiempo, la International Network for the Improvement of Banana and Plantain (Inibap, 2004) menciona que se debe al deterioro de la calidad y salud de los suelos bananeros por tratarse de sistemas intensivos de producción. Con relación a ello, Gauggel, Sierra y Arévalo (2003), Draye, Lecompte y Pagès (2003) y Serrano (2003) coinciden en señalar como fundamental la evaluación del estado de los factores físicos, químicos y biológicos del suelo, ya que son los responsables de determinar el desempeño de las raíces y la productividad de la planta de banano.

Para estudiar la relación espacial existente entre las variables *productividad de la planta*, *salud radical* y *propiedades del suelo*, se requiere de técnicas que permitan organizar los datos, para así determinar el comportamiento de atributos del suelo y de la productividad del cultivo (Jaramillo, Anaya, Restrepo, González & Álvarez, 2011). En este sentido, Castañeda (2011) recomienda la aplicación de los criterios de la agricultura de precisión, por ser una herramienta de gran utilidad en el manejo de todos los factores que afectan los rendimientos y el ambiente en la producción agrícola.

El propósito del presente trabajo fue delimitar zonas de manejo específico con base en propiedades físicas y químicas de un suelo de la planicie lacustrina de la cuenca del lago de Valencia, Venezuela, y variables morfométricas del cultivo de banano (*Musa AAA*).

Desarrollo teórico y metodológico

Área de estudio

La investigación se realizó en la Finca Agropecuaria Punta Larga C.A., ubicada en la depresión del lago de Valencia, entre los meridianos 67° 30' y 67° 34' longitud oeste y los paralelos 10° 12' y 10° 17' latitud norte (figura 1), con una altitud cercana a los 436 m.s.n.m. El principal cultivo de producción es el banano (Cavendish, cv Pineo Gigante), para lo cual se destinan 175 ha aproximadamente, las cuales ocupan parte de la terraza lacustrina de cuarto nivel del Cuaternario, proveniente de las deposiciones adyacentes al lago de Valencia, donde predominan suelos recientes (entisoles y molisoles), que en





general son suelos con buena fertilidad y texturas variables, desde arcillosa hasta franco limosa. La densidad aparente de los suelo suele ser baja, en un intervalo de 0,5-0,9 Mg.m⁻³ (Viloria, 1984).

La zona presenta un clima estacional definido por la clasificación de Köppen como tropical lluvioso, con periodos de precipitación diferenciados, correspondientes a una estación seca de noviembre a abril, y otra lluviosa de mayo a octubre. Los valores medios de las variables meteorológicas se presentan en la tabla 1.

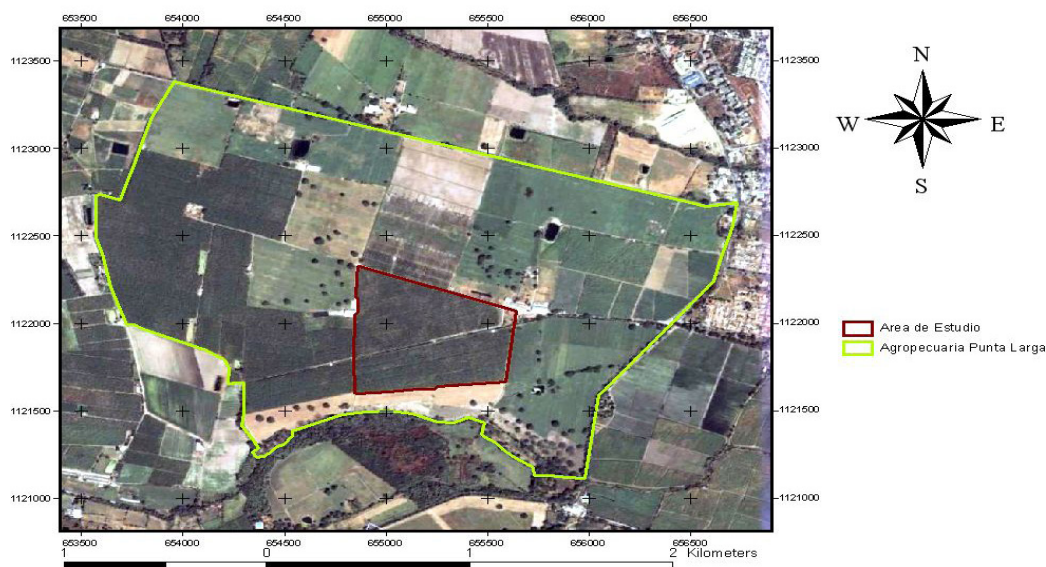


Figura 1. Ubicación de la Finca Agropecuaria Punta Larga y el área de muestreo
Fuente: elaboración propia.

Tabla 1. Promedios de variables climáticas en la Estación Santa Cruz Edafológica, 1966-1999

Estación Santa Cruz Edafológica	Temperatura promedio (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Evaporación media anual (mm)	Humedad relativa (%)	Precipitación media anual (mm)
	26,1	31,8	20,5	2369,2	69,8	988,9

Fuente: Base de datos de las estaciones climáticas del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.

Diseño del muestreo

La evaluación se llevó a cabo en 43 ha correspondientes al 23,88% del área total destinada para la producción de banano (Cavendish, cv Pineo Gigante), cuya clase de suelo es Mollic Ustifluvents, francosa fina carbonática, isohipertérmica. La zona está provista de ocho lotes productivos delimitados por “cable guías” dispuestos a lo largo de la parcela, así como de un canal de riego (figura 2).

Se implementó un muestreo sistemático suelo-cultivo, para lo cual se establecieron sitios de muestreo cada cierta distancia siguiendo un diseño regular establecido. La superficie se muestreó por medio de una cuadrícula, con celdas de 150 x 150 m que cubren el área establecida y el espacio exterior adyacente al perímetro, con el fin de predecir la





magnitud de una variable en un punto de interés no muestreado, tal como mencionan Schabenberger y Gotway (2005). De esta manera se obtuvieron un total de 70 puntos de muestreo georreferenciados mediante un GPS GARMIN 60x, datum REGVEN, proyección WGS84, uso 19N (figura 2).

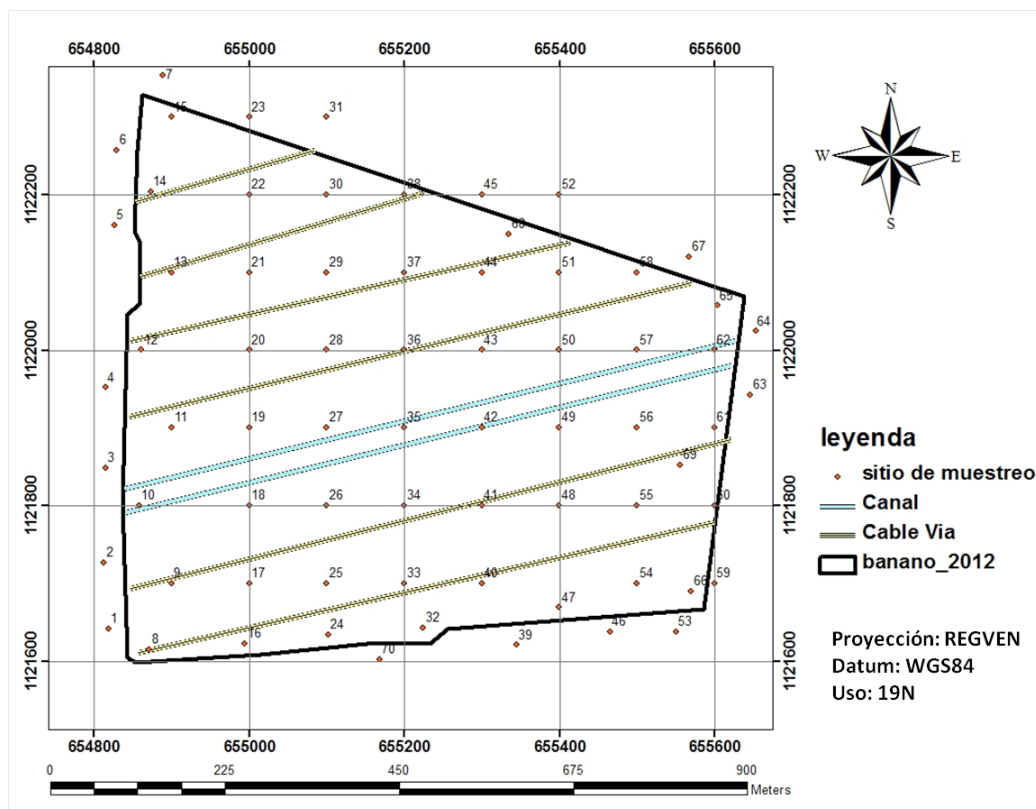


Figura 2. Distribución de los puntos de muestreo en la parcela de banano bajo estudio

Fuente: elaboración propia.

Muestreo del suelo y determinación de propiedades del suelo

Para la evaluación de las propiedades del suelo, se tomó en cada punto una muestra disturbada (0-20 cm) con un barreno. Asimismo, se tomaron muestras no disturbadas (0-20 cm) en 50 de los sitios de muestreo, a razón de tres repeticiones por sitio, en cuyo caso se utilizó un equipo de toma de muestras tipo Uhland.

Variables del suelo evaluadas en muestras disturbadas

- Distribución del tamaño de partículas (DTP) por el método del hidrómetro (Gee & Or, 2002) para obtener los contenidos de arena, limo y arcilla y la clasificación textural del suelo en cada punto de muestreo.
- pH: se determinó en una suspensión suelo:agua 1:1 mediante un potenciómetro y electrodos de vidrio (Gilabert de Brito, López de Rojas & Pérez de Roberti, 1990).
- Conductividad eléctrica (CE): con un conductímetro en una suspensión suelo:agua 1:1. Los valores se expresan en dS/m (Gilabert et al., 1990).
- Carbono orgánico (% CO) por el método de Walkley-Black modificado (Heanes, 1984).





- Fósforo (mg/kg) por el método de Olsen (Olsen, Cole, Watanabe & Dean, 1954).
- Calcio, potasio, sodio, magnesio, hierro, manganeso, zinc y cobre disponibles (mg/kg) con la solución extractora Mehlich 1 (Mehlich, 1978).
- Carbonato de calcio equivalente: el método utilizado se basa en la reacción de descomposición de los carbonatos no solubles por medio de un ácido fuerte; luego, mediante una base fuerte estandarizada, se determinó la cantidad de ácido que quedó sin reaccionar después de la descomposición (Gilabert et al., 1990).
- Nitrógeno total, por el método semi-micro Kjeldahl (Gilabert et al., 1990).

Variables evaluadas en muestras no disturbadas

- Densidad aparente (Da): por el método del cilindro (Blake & Hartge, 1986), expresando los valores en Mg.m^{-3} .
- Porosidad total (EPT) y distribución de tamaño de poros: por el método de Danielson y Sutherland (1986), cuyos valores se expresaron en porcentajes.
- Módulo de ruptura: por el método de Richards (1953), descrito en Pla (1983), enuncia los valores en kPa.
- Conductividad hidráulica saturada: se determinó utilizando un permeámetro de carga constante (Reynolds et al., 2002), expresando los valores en mm/h.

Muestreo de las plantas de banano y determinaciones realizadas

Para determinar el estado de las variables morfométricas aéreas y radicales de las plantas, se realizó un muestreo a razón de ocho (8) plantas/punto que fueron seleccionadas entorno a un radio de 50 m para evitar la medición de plantas pertenecientes a otro punto de muestreo.

Variables evaluadas en la parte aérea del cultivo de banano

Con la finalidad de evaluar los componentes morfométricos aéreos del cultivo, se seleccionaron plantas que estaban en etapa de formación y maduración del fruto, representativas de la productividad del sitio, con racimos de 14 a 16 semanas, y se determinaron los siguientes parámetros:

- Circunferencia de la planta madre (CM): se midió el perímetro del pseudotallo de la planta madre a un metro de altura, partiendo de la superficie del suelo.
- Número de manos por racimo (NM): en el racimo de la planta madre.
- Altura de la planta madre (AM): desde la superficie del suelo hasta el punto de inserción en el pseudotallo de la hoja recién expandida en la planta madre, al momento de la formación del fruto.
- Número de hojas por planta (NH): se contabilizaron las hojas funcionales en la planta madre, las cuales se caracterizaron por no presentar daños por senescencia o enfermedad.





Se estimó el grado de vigor de la plantación mediante la clasificación de los componentes morfométricos aéreos correspondientes a la altura y la circunferencia de la planta madre (tabla 2), de acuerdo a los criterios de Rosales, Pocasangre, Trejos, Serrano y Peña (2008).

Tabla 2. Criterios para la obtención del grado de vigor o frondosidad.

Parámetro	Frondosidad o vigor		
	Baja	Media	Alta
Número de manos por racimo	< 6	6 - 8	> 8
Circunferencia del pseudotallo (cm)	< 80	80 - 90	> 90
Altura (m)	< 2	2 - 2,5	> 2,5

Fuente: Rosales et al. (2008).

Variables evaluadas en la parte radical del cultivo de banano

Para la evaluación de la parte radical de las plantas, se utilizó el método de muestreo de raíces con palín, tomando un cubo de 20 x 20 x 20 cm a una distancia de unos 20-25 cm del hijo de sucesión de la planta florecida. En este volumen de suelo se determinaron las siguientes variables:

- Peso de raíces totales (RT): peso fresco (g) de toda la masa radical contenida en el volumen de suelo extraído.
- Peso de raíces funcionales (RF): se pesaron las raíces funcionales (g) encontradas en la muestra, caracterizadas por ser blancas y cremosas.
- Peso de raíces no funcionales (RNF): se pesaron las raíces no funcionales (g), caracterizadas por presentar colores pardos u oscuros, reflejo de tejido necrosado.
- Porcentaje de raíces funcionales y no funcionales (%): se obtuvo relacionando el peso de las raíces funcionales (RF) y no funcionales (RNF) con respecto al peso total (RT), mediante las ecuaciones 1 y 2.

$$\%RF = \frac{RF(g) * 100}{RT(g)} \quad (1)$$

$$\%RNF = \frac{RNF(g) * 100}{RT(g)} \quad (2)$$





Determinación de la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo y variables morfométricas del banano

Con el propósito de caracterizar el comportamiento de las propiedades del suelo, se organizaron los valores obtenidos del procesamiento de las muestras disturbadas y no disturbadas, considerando para estas últimas el valor resultante de promediar las tres repeticiones de cada uno de los parámetros evaluados. Respecto a las variables morfométricas, se consideró el valor promedio de las ocho (8) observaciones registradas en cada uno de los parámetros aéreos y radicales estudiados en las plantas.

Una vez construida la base de datos, se procedió a realizar un análisis exploratorio para obtener las medidas de tendencia central y de desviación, como: media, desviación estándar, coeficiente de variación, valores máximos y mínimos, asimetría y kurtosis. Según el comportamiento general de las variables, en algunos casos se evidenció que estaban afectados por la presencia de datos anómalos, los cuales fueron identificados por medio de la metodología descrita por Tukey (1977), que implica el cálculo de las cercas internas y externas.

Para determinar la variabilidad espacial de las propiedades del suelo y los parámetros morfométricos del cultivo, se procedió a iniciar el análisis geoestadístico, para lo cual se calcularon los semivariogramas experimentales, los cuales fueron ajustados a modelos teóricos, caracterizando así la estructura de variación a través del uso de sus parámetros (rango de dependencia espacial, umbral o sill y varianza nugget o aleatoria) en la función de kriging ordinario, obteniendo así los mapas que ilustran la distribución espacial de las variables (Gallardo, 2006). Para disminuir la posibilidad de sobre o subestimación en los mapas generados, por el hecho de haber usado las variables originales sin sufrir efectos de transformación, se consideró la normalización de los mapas ráster a partir del re-escalado de los datos para así llevarlos al mismo rango ($V_{max}-V_{min}$) de los datos originales, a través de la aplicación de la ecuación 3 (Durand, 2009):

$$V_n = Q_{min} + \frac{(V_o - V_{min}) * (Q_{max} - Q_{min})}{(V_{max} - V_{min})} \quad (3)$$

Donde:

V_n = Valor normalizado del nuevo mapa ráster

V_o = Mapa ráster con los valores originales

V_{min} y V_{max} = Valores máximos y mínimos del mapa ráster

Q_{max} y Q_{min} = Valores máximos y mínimos de la data (nuevo rango)

Se aplicó, a su vez, un estadístico de bondad de ajuste para la validación de los estimados de kriging normalizados y sin normalizar, representado por la raíz media estandarizada del cuadrado del error de predicción (RMSSPE) cuyo valor debe ser cercano a 1. Para su cálculo se utilizó la ecuación 4:

$$RMSSPE = \sqrt{\frac{1}{n} \left[\frac{\sum (Z(x_i) - \hat{Z}(x_i))^2}{\hat{\sigma}^2(x_i)} \right]} \quad (4)$$

Donde: $Z(x_i)$ representa el valor observado, $\hat{Z}(x_i)$ el valor predicho y $\hat{\sigma}^2(x_i)$ la predicción para la desviación estándar en la localización i .





Relación entre las características del suelo y las variables morfométricas del banano

Una vez conocida la distribución de cada variable en particular, se procedió a determinar la asociación entre las propiedades del suelo y la expresión productiva de las plantas a través de la construcción de matrices de correlación de Pearson. Con el propósito de facilitar el manejo de la información generada, se realizó un análisis de componentes principales (ACP), a partir del cual se obtuvo un número reducido de nuevas variables no correlacionadas (componentes) que explican la mayor parte de la variabilidad (ecuación 5); estas son obtenidas por orden decreciente de importancia, por medio de la combinación lineal de las variables originales y los vectores asociados a los componentes (pesos) (Pla, 1986).

$$Y_j = v_{1j}X_1 + v_{2j}X_2 + \dots + v_{pj}X_p \quad (5)$$

Donde: Y_j = componente principal j ; v_{pj} = coeficiente de la variable p en el componente j (eigenvector); y X_p = variable p .

De los componentes principales (CP) generados, se seleccionaran los primeros, cuya suma de proporción de varianza explicada fue satisfactoria para el análisis (Pla, 1986). Para interpretar el significado de cada componente, se implementó el criterio de selección (CS) propuesto por Afifi y Clark (1984), calculado según la ecuación 6, el cual permitió identificar la asociación entre los CP y las variables originales.

$$CS = \frac{0.5}{\sqrt{VarCP}} \quad (6)$$

Donde $\sqrt{VarCP}$ representa al valor propio del componente principal.

Como resultado se obtiene la variable asociada al componente cuando el coeficiente de correlación es mayor al CS. Para completar el análisis, se construyeron gráficos de dispersión entre los componentes principales de mayor capacidad explicativa de los datos, con el fin de realizar interpretaciones respecto al comportamiento entre las variables y la distribución de las observaciones para determinar posibles grupos de individuos con características diferenciales (Demey, Adams & Freitas, 1994).

Definición de zonas de manejo específico con base en variables del suelo y parámetros morfométricos del cultivo

Para obtener una clasificación del área bajo estudio con base en los fenómenos que ocurren de forma paralela en el continuo del suelo y que están asociados a las variables analizadas, se implementaron los métodos de redes neuronales artificiales (RNA) y lógica





borrosa a través de un sistema clasificador de terreno por fuzzy Kohonen (FKCN) (Viloria, Viloria, Núñez & Pineda, 2009).

De esta forma, se cargaron en el programa cada una de las variables de interés y esto dio como resultado una matriz de píxeles de expresión borrosa, representados por un vector de pertenencia. Inicialmente, se creó una topología por lote, considerando la aplicación de un rango de exponente borroso (Φ) comprendido entre 1,1 y 1,8, con incrementos de 0,1 y un número de clases de 4 a 12 con un máximo de 20 interacciones. La información resultante permitió generar un gráfico para evaluar la variación de la eficiencia de borrosidad (FPI, por *fuzziness performance index*) a partir de las diferentes combinaciones de (Φ) y número de clases, considerando que cuando el FPI es igual uno, la borrosidad lograda es la máxima y no hay distinción entre clases, mientras que si se obtiene un valor de FPI igual a cero indica que no hay borrosidad en los datos y las clases son discretas. En ambos casos los resultados serán descartados como posibles modelos, y el más representativo para la delimitación de las áreas homogéneas de manejo será aquel cuyos valores de FPI sean próximos a 0,5. Finalmente se creó una topología específica, la cual genera un archivo *.asc de un mapa de clases suelo-cultivo en formato ASCII, el cual fue importado desde el programa ArcGIS para ser visualizado como un mapa ráster cuyas celdas presentan una clasificación discreta, donde cada una tiene asignada la clase con el valor más alto de función de pertenencia.

A partir del concepto central de las variables para cada una de las clases, se pudo predecir el comportamiento del suelo en las diferentes agrupaciones. En tal sentido, se hizo especial énfasis en aquellas variables de orden físico y químico que aportaron mayor diferenciación entre clases, tanto por el efecto entre ellas como por su influencia en la expresión de los componentes morfométricos aéreos y radicales de las plantas.

Resultados

Los resultados del análisis geoestadístico realizado indicaron que las propiedades físicas del suelo evidencian, de forma general, variaciones orientadas en sentido este-oeste, de forma concéntrica en torno al lago de Valencia, que está ubicado en la parte oeste de la parcela (figura 3). Se puede observar cómo en la mayor parte del área se concentran proporciones medias de las fracciones granulométricas ($\approx 33\%$ c/u), y se nota además que, en la zona noreste de la parcela, se presentan las mayores proporciones tanto de arena como de fragmentos gruesos, lo cual puede deberse a que son deposiciones del lago que han estado expuestas durante mayor tiempo al proceso de erosión, donde el desplazamiento de las partículas más livianas, como la arcilla y el limo, a las zonas más cercanas al lago ha hecho que predomine in situ el material lacustrino (caracolillo). Los suelos con mayor porosidad total se ubican en torno a la zona oeste de la parcela, mientras que los poros con $r < 15\mu\text{m}$, al ser los tipos de poros predominantes, parecen marcar una mayor influencia sobre el patrón de distribución de la porosidad total (figura 4).



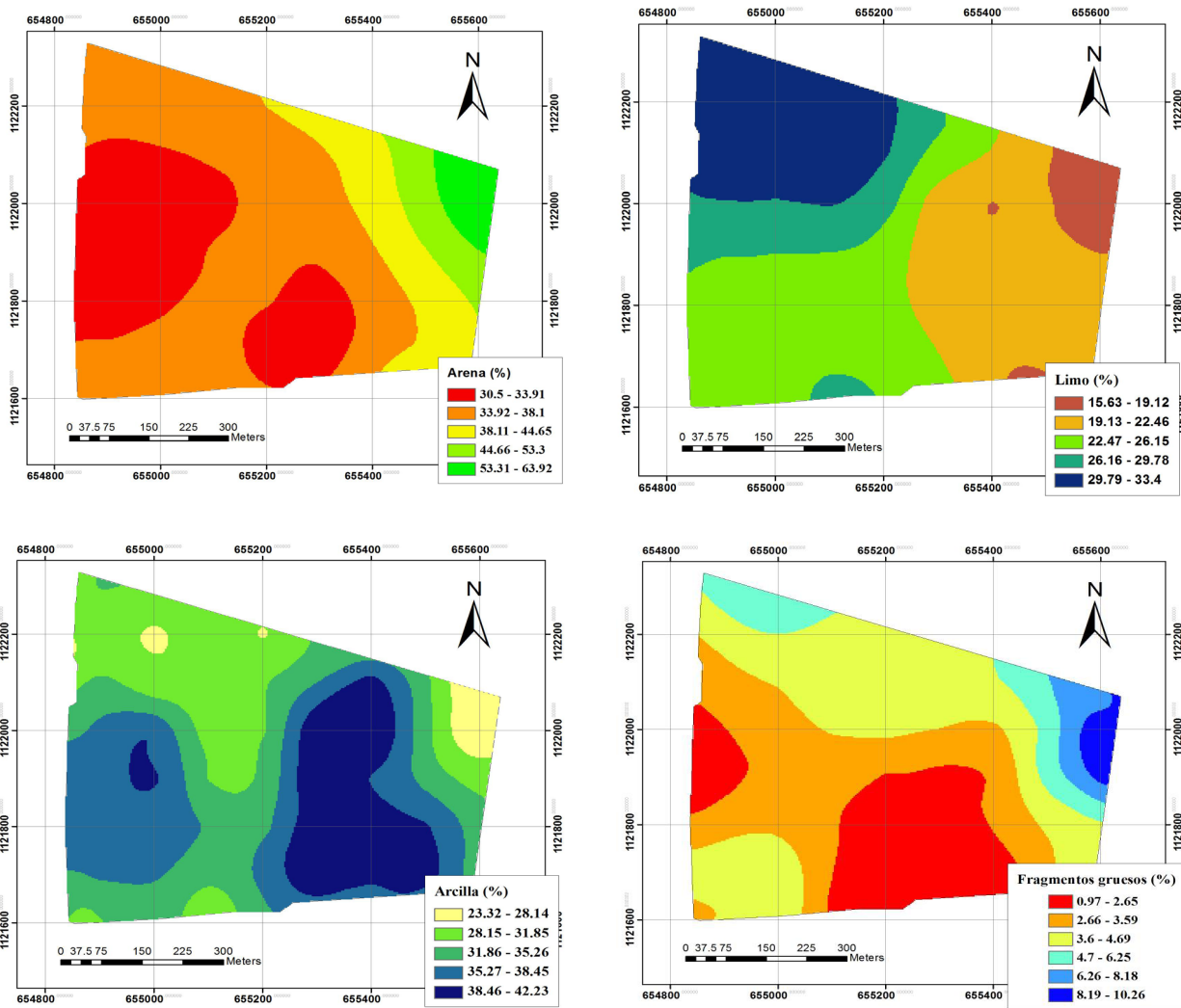


Figura 3. Distribución espacial de la proporción (%) de arena, limo, arcilla y fragmentos gruesos
Fuente: elaboración propia.

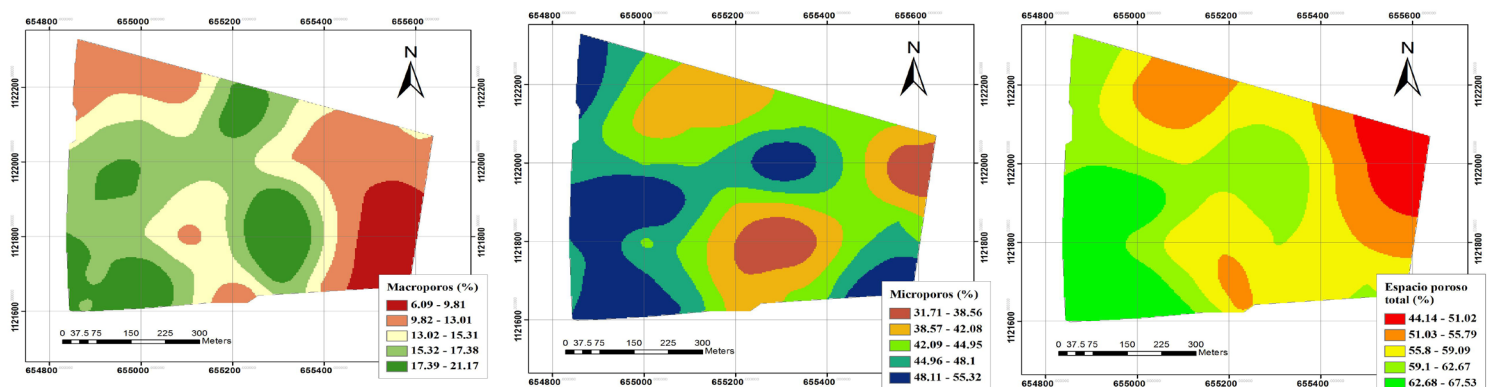


Figura 4. Distribución espacial de variables: macroporos, microporos y porosidad total
Fuente: elaboración propia.





En la zona este es donde se presentan los valores más altos de densidad aparente y módulo de ruptura, así como los menores valores de conductividad saturada. Esta relación era de esperarse, ya que donde ocurren valores mayores de densidad aparente los suelos expresan una mayor cohesión en seco y mayores limitaciones para el flujo de agua (figura 5).

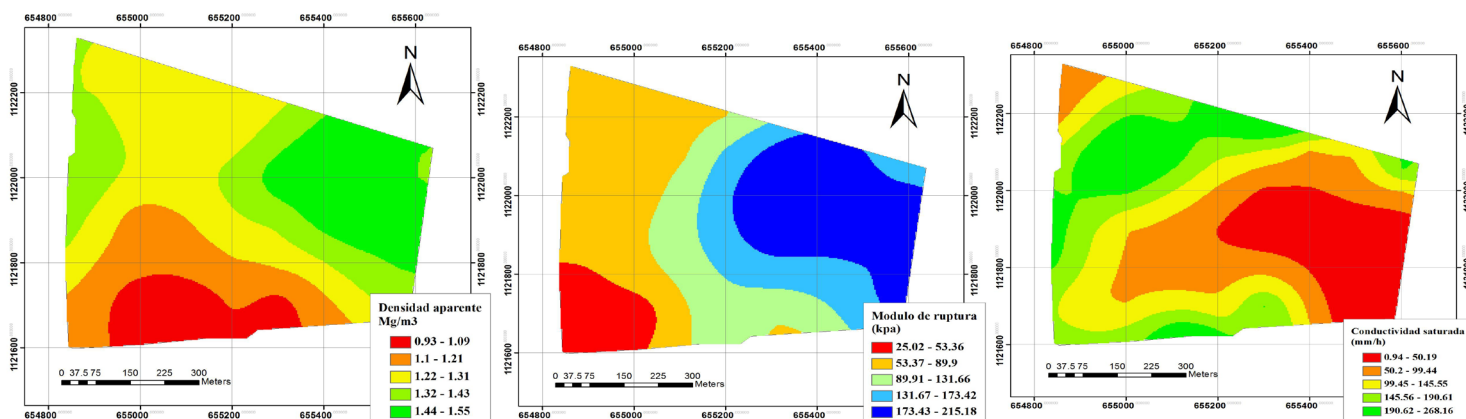


Figura 5. Distribución espacial de variables: densidad aparente, módulo de ruptura y conductividad hidráulica saturada
Fuente: elaboración propia.

Se puede apreciar que el patrón de la distribución espacial del contenido de potasio y fósforo es similar al patrón de partículas granulométricas y presenta la mayor variación en sentido oeste-este. La distribución del contenido de nitrógeno total presentó un patrón más intrincado (figura 6).

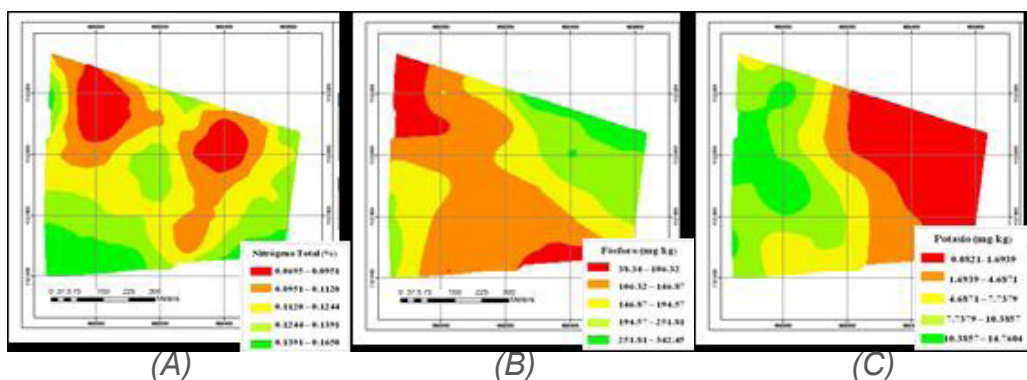


Figura 6. Mapa de distribución espacial de (A) nitrógeno total, (B) fósforo y (C) potasio
Fuente: elaboración propia.

Los mayores valores de pH y de carbonato de calcio se encontraron en el centro del terreno. Se aprecia una mayor variación en el sentido oeste-este por el patrón de formación de las terrazas lacustrinas concéntricas al lago de Valencia (figura 7). Por su parte, la conductividad eléctrica y la materia orgánica mostraron un patrón de variación más intrincado, con cambios a cortas distancias.

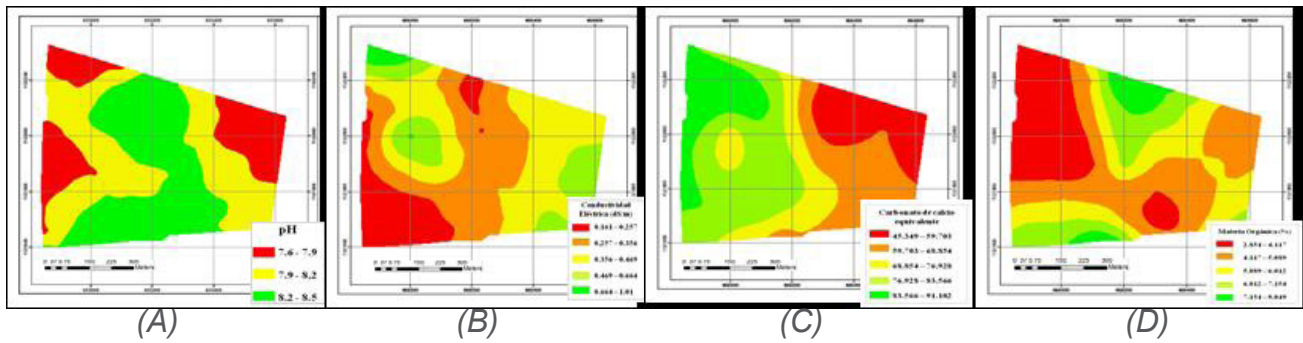


Figura 7. Mapa de distribución espacial: (A) pH, (B) conductividad eléctrica, (C) carbonato de calcio y (D) materia orgánica

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a otros nutrientes disponibles (figura 8), el patrón de distribución espacial resultó similar en sentido oeste-este, donde el cobre va aumentando en ese mismo sentido mientras que el hierro, el magnesio y el manganeso van disminuyendo. Los contenidos de sodio y zinc presentaron un patrón de variación más intrincado, con cambios abruptos a cortas distancias.

Con relación a las variables morfométricas aéreas del cultivo, los mayores valores, tanto de la circunferencia del pseudotallo como de la altura de la planta madre, se presentan en la zona noroeste de la parcela, lo cual coincide con los índices *módulo de ruptura*, *densidad aparente* y *conductividad saturada del suelo*. Las plantas de menor altura y número de manos se ubican en torno a la parte media de la parcela. Se evidencia, además, un menor número de hojas en plantas de mejor expresión con relación a los demás componentes aéreos y viceversa. Así mismo, la distribución del número de manos presentó un patrón de distribución particular en comparación al resto de las variables y, por lo general, se encuentra un mayor número de manos en plantas cercanas al perímetro de la parcela (figura 9).

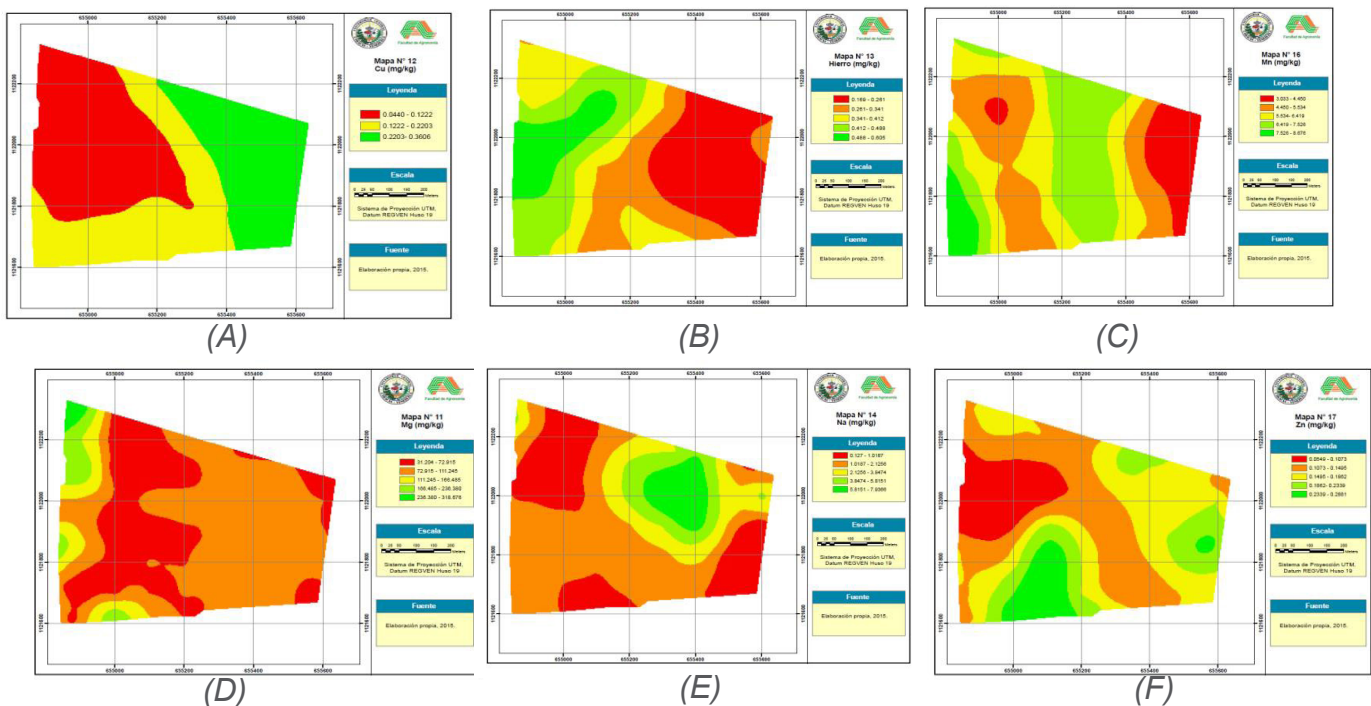


Figura 8. Mapa de distribución espacial: (A) cobre, (B) hierro, (C) manganeso, (D) magnesio, (E) sodio y (F) zinc

Fuente: elaboración propia.



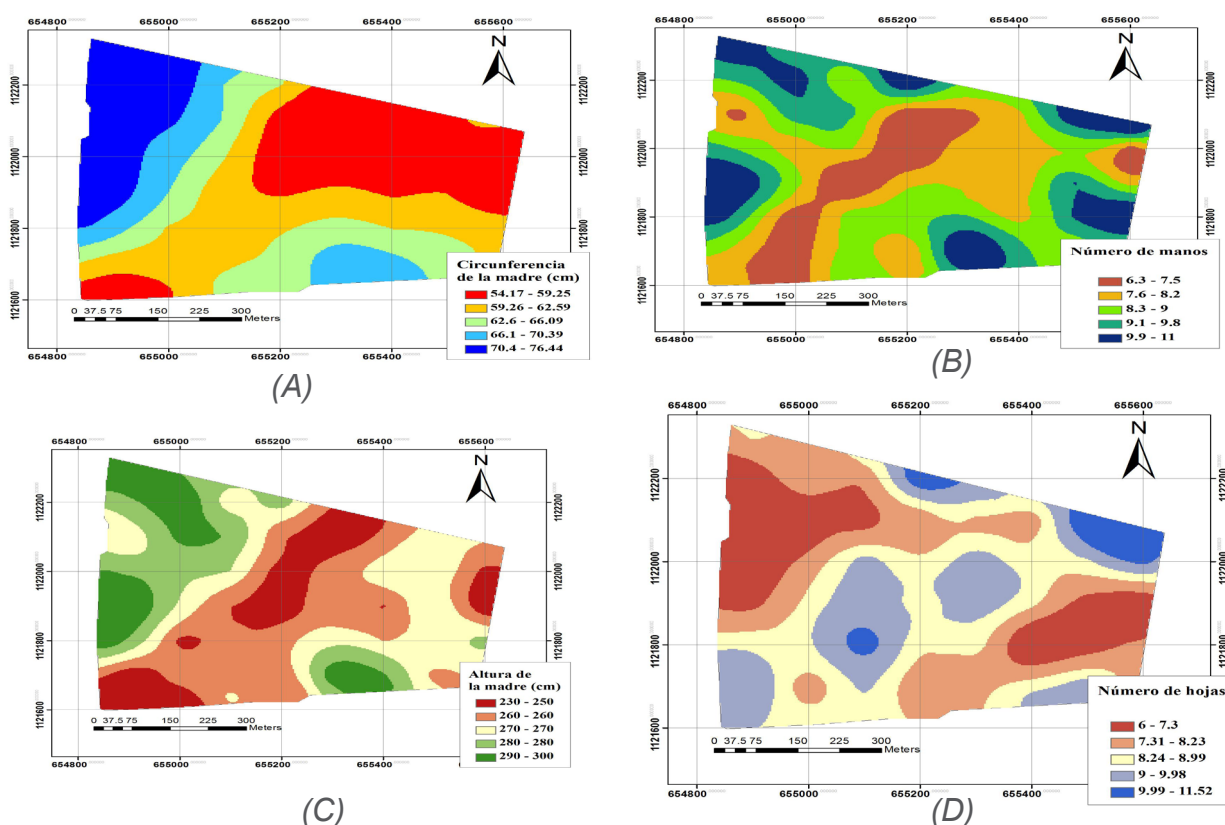


Figura 9. Distribución espacial de las variables morfométricas aéreas de las plantas de banano: (A) circunferencia de la madre, (B) número de manos, (C) altura de la madre y (D) número de hojas.

Fuente: elaboración propia.

El vigor obtenido por las plantas es variable conforme a los criterios utilizados. Al considerar la circunferencia de la madre, la clasificación del vigor de las plantas resultó baja en la totalidad del área de interés, mientras que, al tomarse como criterio el número de manos, se evidencia diferenciación. Por lo general, se encontró un vigor alto en plantas cercanas al perímetro y un vigor medio en la zona central de la parcela (figura 10).

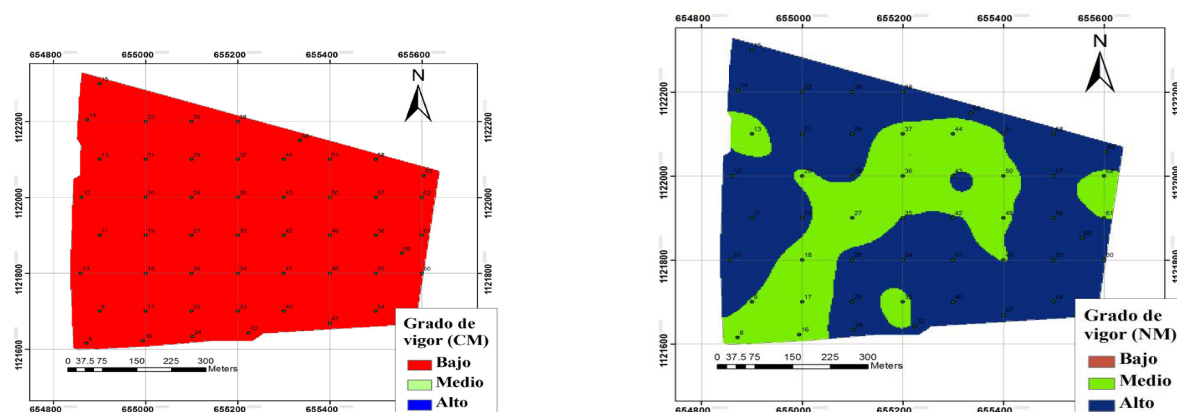


Figura 10. Distribución espacial del grado de vigor o frondosidad de las plantas en función de (A) la circunferencia de la madre y (B) el número de manos

Fuente: elaboración propia.





La cantidad de raíces emitidas en las plantas de banano tiende a disminuir claramente en sentido este-oeste y se mantiene una asociación espacial entre las variables *raíces totales*, *funcionales* y *no funcionales*, cuyos valores se expresan en gramos (g), mientras que la proporción (%) de raíces funcionales y no funcionales dibujan un patrón de distribución particular (figura 11).

Una vez realizado el análisis de componentes principales (ACP) y seleccionadas las variables de mayor contribución, se procedió a la obtención del número de clases para la delimitación de las zonas de manejo específico, tanto para las variables físicas del suelo como para las variables químicas y su relación con el comportamiento del cultivo. Para ello se evaluó inicialmente el comportamiento del índice de borrosidad (FPI) logrado en las diferentes combinaciones entre los valores de exponente borroso (Φ) y el número de clases. Se obtuvo un valor intermedio del FPI (cercano a 0,5) en la curva con coeficiente borroso de 1,3, en la cual se seleccionó, como número óptimo de clases, el valor del punto de inflexión donde ocurre la minimización del FPI, caracterizado por presentar clases menos borrosas internamente (Odeh, McBratney & Chittleborough, 1992). El resultado final, a partir de las 16 variables físicas del suelo y morfométricas del cultivo, fue un número óptimo de cinco clases, las cuales definieron las áreas homogéneas de manejo en las 43 ha que conforman la parcela de banano (figura 12), mientras que para las variables químicas y morfométricas del cultivo se obtuvo un número óptimo de cuatro clases.

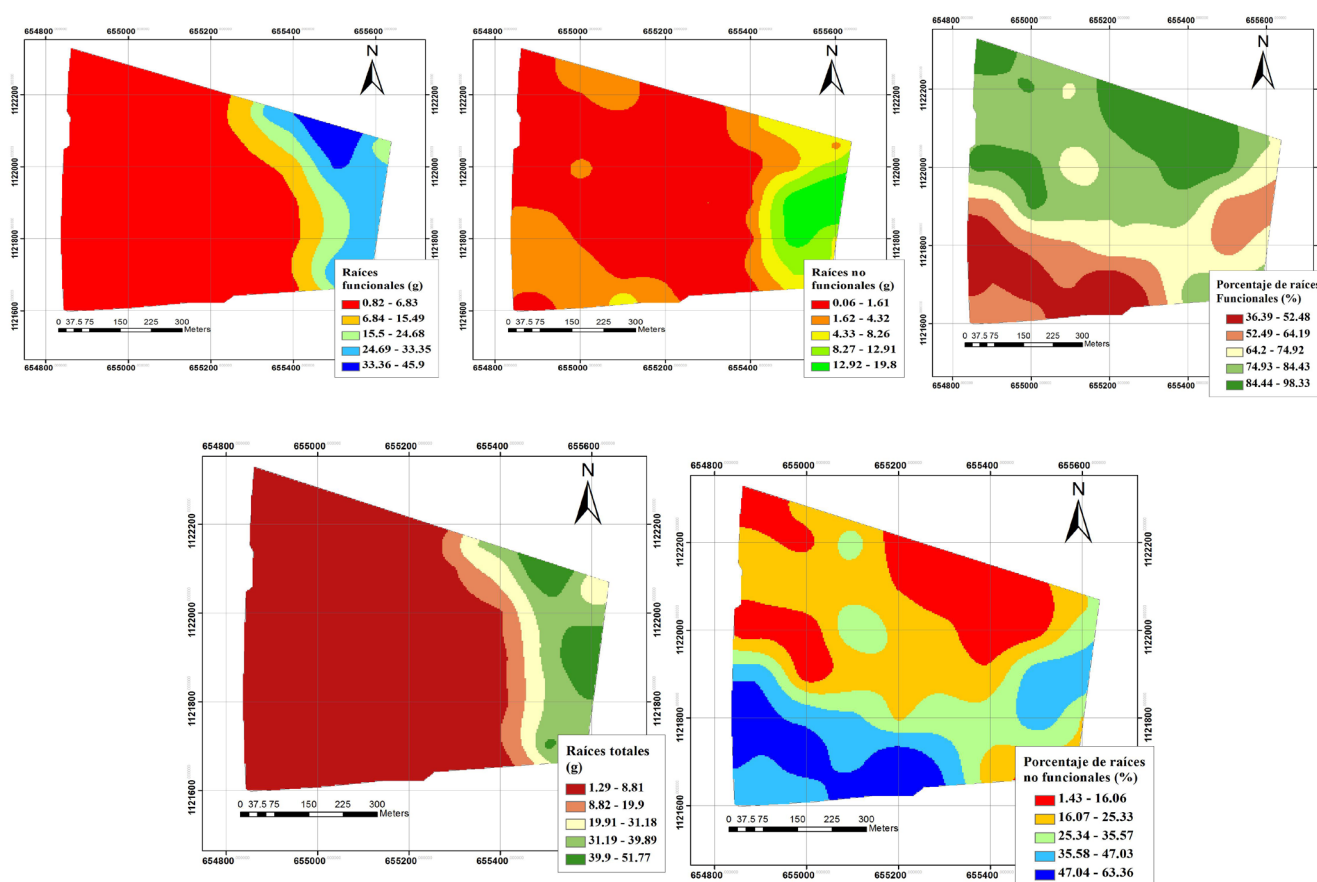


Figura 11. Distribución espacial de los parámetros radicales evaluados en las plantas de banano

Fuente: elaboración propia.



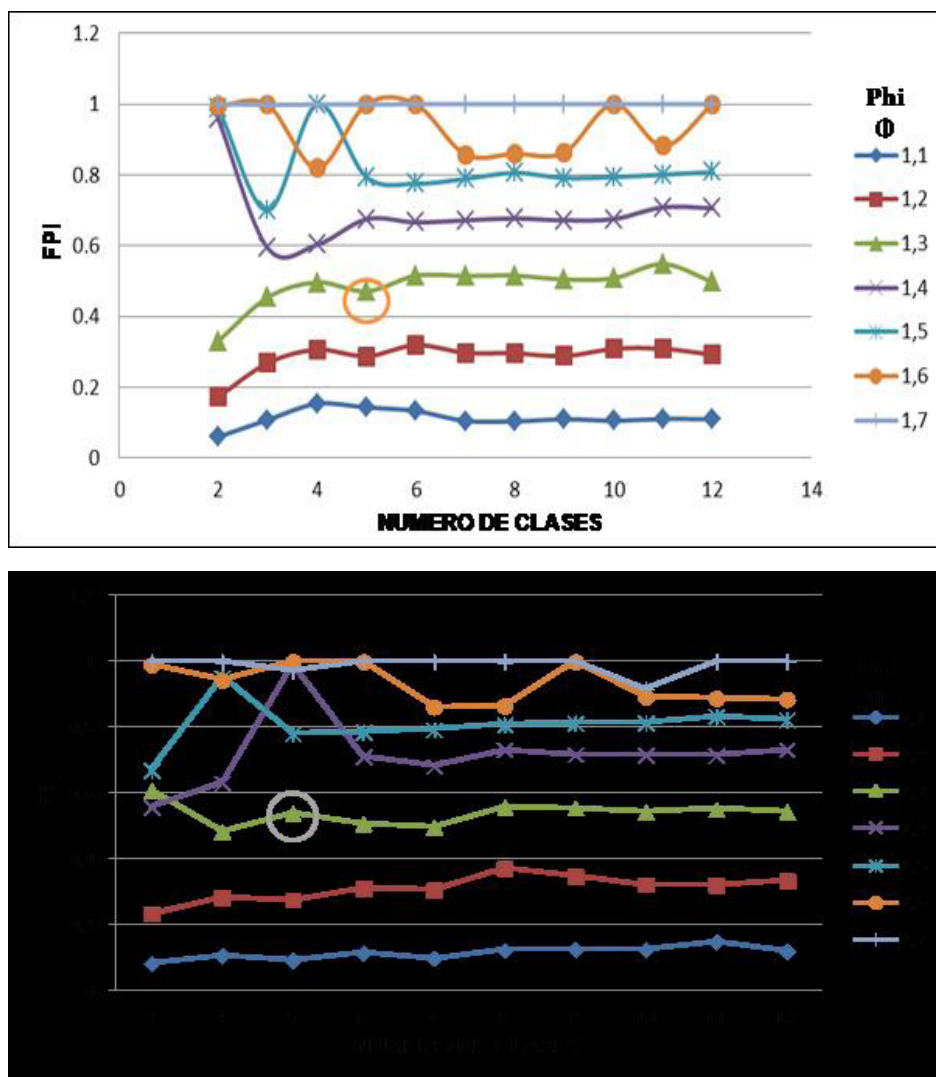


Figura 12. Variación del índice de borrosidad (FPI) en función del número de clases y el exponente borroso Φ : (A) variables físicas y (B) variables químicas
Fuente: elaboración propia.

Se obtuvo, de esta forma, un mapa ráster en formato *asc que, desplegado en el visor de ArcGIS, muestra de forma discreta la representación de las cinco clases suelo-cultivo para las variables físicas del suelo, orientadas en sentido este-oeste de forma concéntrica en torno al lago de Valencia, lo cual, de manera general, coincide con el patrón de distribución espacial de las variables físicas del suelo y morfométricas del cultivo. Los lotes, al encontrarse dispuestos de forma perpendicular a las clases obtenidas, muestran una gran variabilidad en las variables morfométricas de las plantas y físicas del suelo (figura 13). Para las variables químicas se encontró que el patrón de variabilidad va en sentido oeste-este, paralelo al lago de Valencia, en el mismo sentido en el que ocurre la diferenciación de las terrazas, que presentan una distribución concéntrica alrededor de todo el lago.

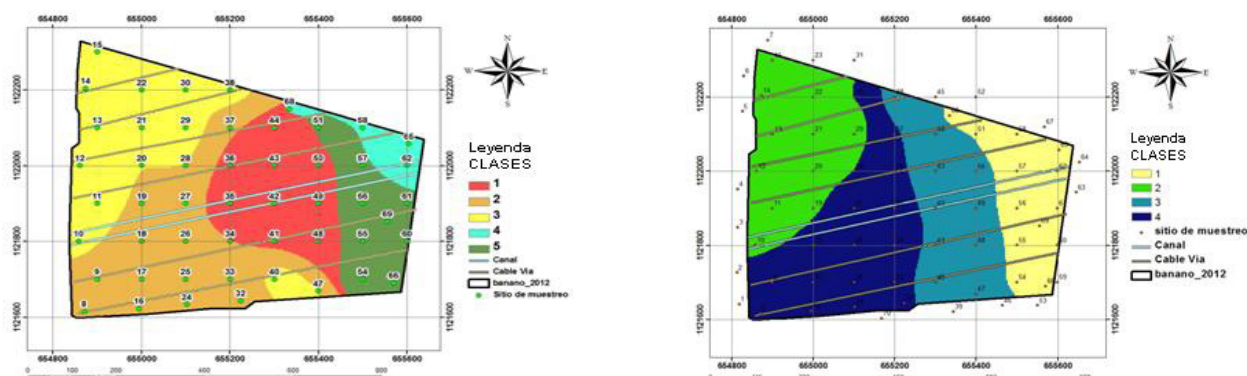


Figura 13. Clases suelo-cultivo que definen las zonas de manejo específico en la parcela de banano ubicada en la Finca Agropecuaria Punta Larga: (A) en función de las variables físicas del suelo y (B) en función de las variables químicas

Fuente: elaboración propia.

Con respecto a las variables físicas del suelo (tabla 3), las clases 2 y 3 presentan, en general, condiciones favorables para el desarrollo del cultivo, con suelos caracterizados por ser franco arcillosos y sin limitaciones de orden físico para dicha clase textural (se evidencian los valores más bajos del módulo de ruptura y de densidad aparente). La proporción de macroporos y microporos condicionan suelos con alta retención de humedad y flujo de agua y aire, por lo menos en los primeros 20 cm del perfil. También se presentan proporciones relativamente bajas de fragmentos gruesos. El estado de todos estos factores representa un contexto que, en general, proporciona una de las mejores expresiones del vigor y la salud radical en la parcela de banano bajo estudio.

La clase 1 está conformada por suelos de tendencia arcillosa (más pesados) y presenta incrementos tanto en la densidad aparente como en el módulo de ruptura, aunado a la consecuente disminución de la conductividad hidráulica saturada. Estas condiciones, en conjunto, limitaron la expresión de los componentes morfométricos aéreos en las plantas, dando lugar, finalmente, a la clase con menor vigor del cultivo de banano, al tiempo que se evidencia, en la parte radical, un leve aumento en la cantidad de raíces totales y funcionales.

Por otra parte, las clases 4 y 5 suelen ser suelos de textura franco arcillo arenosa y franco arcillosa respectivamente. Ambas delineaciones coinciden en presentar las proporciones más altas de fragmentos gruesos y masa radical, así como los valores más altos de densidad aparente y módulo de ruptura. A su vez, solo en la clase 5 se evidencia una proporción de poros con $r > 15\mu\text{m}$, considerada como limitante para el flujo de agua y aire en el suelo ($< 10\%$).

Es notoria la relación persistente entre dichas clases y el material lacustrino, el cual parece aportar una variante en el suelo (bajo las condiciones físicas particulares) que incentiva a la planta a emitir mayor masa radical. Dicho mecanismo, sin duda, le permite asegurar su permanencia y producción tras posibles reducciones en las dimensiones de las variables *circunferencia de la madre* y *altura de la madre*. Es evidente que la aplicación de alternativas tecnológicas en las zonas homogéneas de manejo (clases) se dificultaría si se mantiene el arreglo de los ocho lotes, ya que dentro de cada uno se evidencian condiciones de suelo y de cultivo diferenciales. Es por ello que se recomienda reposicionar los lotes en función de las clases para así poder implementar las prácticas del manejo suelo-cultivo propicias para cada condición.





Tabla 3. Centroides de las clases suelo-cultivo en función de las variables físicas del suelo

	1	2	3	4	5
ARE	36,07	34,75	34,88	54,3	44,76
LIMO	22,23	25,2	29,77	20,53	20,22
ARC	37,79	34,62	31,99	28,7	34,89
EPT	58,94	60,59	58,87	49,84	54,81
MACRO	15,47	16,04	14,56	13,81	8,65
Micro	43,72	45,27	45,05	41,93	45,26
Da	1,36	1,14	1,28	1,43	1,43
MR	177,1	87,22	73,25	142,1	179,2
Ksat	64,07	137,9	170,8	197,2	28,45
FG	3,17	3,09	3,83	7,11	4,74
CM	59,12	62,42	70,05	58,75	60,27
AM	254,6	257,2	257,3	257,4	257,5
NM	7,90	8,20	9,44	9,34	8,99
RF	6,12	4,32	3,55	31,11	27,29
RNF	1,23	1,50	1,18	6,79	9,27
RT	6,19	4,98	3,89	36,28	34,96

Leyenda: ARE: arena; LIM: limo; ARC: arcilla; EPT: espacio poroso total; MACRO: macroporos; Micro: microporos; Da: densidad aparente; MR.: módulo de ruptura; Ksat: conductividad saturada; FG: fragmentos gruesos; CM: circunferencia de la madre; AM: altura de la madre; NM: número de manos; RF: raíces funcionales; RNF: raíces no funcionales; RT: raíces totales.

Fuente: elaboración propia.

Con relación a las clases suelo-cultivo en función de las variables químicas (tabla 4), se encontró que la clase 1, en general, presenta una textura franco arcillo arenosa con un contenido muy alto de P y CaCO_3 , alto contenido de materia orgánica (MO), medio de Mg, bajo de nitrógeno total, K y micronutrientes. En cuanto a los parámetros morfométricos, presenta mayor cantidad de número de hojas y raíces funcionales.

Por su parte, la clase 2 presenta una textura franco arcillosa, con bajo contenido de nitrógeno total, K y micronutrientes, y muy altas concentraciones de P, CaCO_3 y Mg. Se puede observar que, además, se encuentran plantas madres con pseudotallo pequeño y pocas raíces funcionales, pero con alto contenido de número de manos.

La clase 3 presenta, en general, una textura arcillosa, niveles muy altos de P y CaCO_3 , MO media, contenido alto de Mg, bajo contenido de N total, K y micronutrientes; en cuanto a las variables morfométricas, presenta plantas con baja cantidad de raíces funcionales y bajo vigor. La clase 4, al igual que la clase 2, presenta una textura franco arcillosa, niveles muy altos de P y CaCO_3 , MO media, contenido medio de Mg y bajo contenido de N total, K y micronutrientes. En relación con las variables morfométricas, presenta bajo contenido de raíces funcionales, baja circunferencia de la madre y niveles medios de número de manos.



**Tabla 4.** Centroides de las clases suelo-cultivo en función de las variables químicas del suelo

	1	2	3	4
ARE	50,38	33,97	37,16	34,59
LIM	20,49	30,19	22,97	25,83
ARC	31,28	32,50	36,84	33,72
NTotal	0,14	0,11	0,12	0,13
P	272,77	121,76	176,55	141,24
K	0,30	9,77	2,01	7,27
Ca	4377,0	2934,6	4008,8	3197,0
CaCO ₃	56,37	83,97	64,50	78,28
MO	5,92	3,80	5,91	5,64
Cu	0,28	0,09	0,22	0,13
Mg	69,61	123,98	88,92	77,65
Mn	4,89	5,89	6,54	6,36
Fe	0,24	0,46	0,30	0,38
Zn	0,19	0,11	0,15	0,19
NH	8,99	7,45	8,76	8,84
NM	9,19	9,20	8,77	8,00
AM	258,48	280,57	263,25	254,36
CM	59,27	71,30	61,66	61,78
RF	29,83	3,05	7,61	3,25
RNF	7,96	1,25	1,46	1,47
RT	36,31	3,55	7,68	4,08

Leyenda: ARE: arena, LIM: limo, ARC: arcilla, CM: circunferencia de la madre, AM: altura de la madre, NM: número de manos, NH: número de hojas, RF: raíces funcionales, RNF: raíces no funcionales, RT: raíces totales, P: fósforo, MO: materia orgánica, CaCO₃: carbonato de calcio equivalente, CE: conductividad eléctrica, NTotal: nitrógeno total, Ca: calcio, Na: sodio, K: potasio, Mg: magnesio, Zn: zinc, Fe: hierro, Mn: manganeso, Cu: cobre.

Fuente: elaboración propia.

En general, las cuatro clases son similares desde el punto de vista interpretativo respecto a las propiedades de los suelos, a excepción de la MO y el Mg. Sin embargo, se aprecia que los suelos con una proporción similar de arena, limo y arcilla ($\approx 33\%$ c/u) son los que presentaron plantas de mayor vigor, aun cuando estas presentaron la más baja cantidad de raíces totales y funcionales. En relación a las propiedades químicas, el mayor vigor del banano estuvo asociado a los menores contenidos de fósforo y calcio, debido a que en las otras zonas de manejo los contenidos de estos elementos son muy altos, lo cual posiblemente causa desbalances nutricionales. Por otra parte, el mayor vigor se presentó en los suelos con los mayores niveles de potasio (elemento esencial para el banano), magnesio y hierro. Estos resultados pueden ser usados para replantear los lotes en el terreno y ajustar el manejo de acuerdo a las características particulares de los suelos, como una manera de ir hacia una agricultura de precisión.





Es importante señalar que se planteó la generación de un mapa de unidades de manejo con base en vigor del cultivo y las variables físicas de suelo, y otro con base en el vigor del cultivo y las variables químicas de suelo. Esto debido a que el manejo de las propiedades físicas, en el caso de banano, se puede realizar en la renovación de los lotes (cada 5 a 10 años) a través de la construcción de drenajes, el uso de diferentes implementos de preparación y la cantidad de pases efectuados. En el caso de las propiedades químicas de suelo, estas pueden manejarse anualmente de manera diferencial. Sin embargo, en este caso la conformación de las unidades de manejo está muy relacionada con el proceso de formación de las terrazas lacustrinas y se aprecia cómo ambos mapas son muy similares, lo cual indica que la conformación de los lotes debería seguir una orientación norte-sur, que es la dirección de menor variabilidad.

Conclusiones

- La variabilidad espacial de los componentes morfométricos que describen el vigor del banano (*Musa AAA*) y de las propiedades físicas de suelo presentan, en general, un patrón de distribución orientado en sentido este-oeste, de forma concéntrica en torno al lago de Valencia. Se encontró que los componentes morfométricos aéreos y radicales de las plantas están asociados, lo cual se evidencia en una mayor altura y un mayor grosor del tallo conforme la planta tiende a disminuir la masa radical. El número de manos, por su parte, se mostró invariable ante el comportamiento de los parámetros radicales de la planta, por cual el hecho que la planta emita mayor cantidad de raíces no implica que tenga una mayor o menor cantidad del número de manos; esto se cumple, por lo menos, bajo este contexto edafoclimático particular.
- El comportamiento de las variables radicales del cultivo se encuentra asociado con las propiedades físicas del suelo. Las plantas presentan una mayor producción de raíces totales y no funcionales tanto en los suelos más pesados (arcillosos) como en los suelos con predominio de fragmentos gruesos (caracolillo), y esta última resultó ser la condición de mayor influencia sobre el comportamiento de los parámetros radicales.
- Se definieron cinco zonas de manejo específico con base en un conjunto de 16 variables, entre propiedades físicas y morfométricas del cultivo, por medio de un modelo producido por la red neuronal borrosa FKCN, la cual permitió agrupar los suelos en cinco clases, orientadas en sentido este-oeste. Esta delineación estuvo fuertemente influenciada por la textura del suelo y se encontraron, por lo general, plantas de mayor vigor en los suelos franco arcillosos y de menor vigor en los suelos arcillosos. Los índices *módulo de ruptura*, *densidad aparente* y *conductividad saturada* fueron los de mayor influencia sobre el comportamiento de los parámetros aéreos del cultivo.
- Las propiedades físicas que proporcionaron la mayor distinción entre clases fueron los macroporos, la densidad aparente, el módulo de ruptura y la conductividad saturada. Los lotes están dispuestos de forma perpendicular a las clases obtenidas, por lo cual atraviesan el máximo de la variabilidad. Reposicionar los lotes en función de las clases es una alternativa que facilitaría la aplicación de las prácticas de manejo específicas en las zonas homogéneas.
- Con respecto a las variables químicas, el suelo mostró niveles altos de fósforo, mientras el nitrógeno total y el potasio presentan niveles de medios a bajos. Los contenidos





de calcio fueron muy altos, asociados a la presencia de caracolillo en el suelo, y los de magnesio, de bajos a altos. Los micronutrientes presentan un contenido bajo, relacionado con la reacción alcalina que tienen los suelos. En la parcela se aprecian zonas con concentraciones medias de sales, condición limitante para el cultivo de banano. Finalmente, los contenidos de materia orgánica fueron de medios a altos.

- El vigor de las plantas de banano presentó una variación espacial relacionada con la variabilidad de las propiedades químicas de los suelos que fueron analizadas, principalmente en Ca, CaCO_3 , K, Mg, Fe y Cu. Esta correlación fue interpretada mediante los conjuntos neuroborrosos para definir cuatro zonas de manejo en la parcela.
- Las cuatro zonas de manejo que se definieron presentan una distribución en sentido oeste-este que coincide con la variación de las terrazas lacustrinas que se orientan de forma concéntrica en torno al lago de Valencia. De esta manera, los lotes actuales (unidad de manejo de la finca) están orientados en el sentido de la máxima variabilidad, haciendo engorroso el manejo por sitio específico.
- El manejo agronómico del banano (cultivo permanente) planteó la generación de zonas de manejo basadas en la relación entre variables físicas de suelos y cultivos, y otras basadas en variables químicas de suelos y cultivos. Aun cuando se generaron cinco y cuatro zonas de manejo para las variables físicas y químicas de suelos, respectivamente, ambos mapas son similares, lo cual evidencia la influencia de la formación concéntrica típica de suelos lacustrinos.





Bibliografía

- Afifi, A. & Clark, V. (1984). *Computer-aided multivariate analysis*. Belmont, California: Lifetime Learning Publications.
- Blake, G. & Hartge, K. (1986). Bulk Density. En: A. Klute (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part I: Physical and Mineralogical Methods* (pp. 363-375). [Agronomy Monograph N° 9] (2nd ed.). Madison: ASA and SSSA.
- Castañeda, D. (2011). *Evaluación de métodos estadísticos para el desarrollo de una propuesta de manejo por sitio específico para banano*. (Tesis doctoral). Medellín, Colombia, Universidad Nacional de Colombia.
- Confederación de Asociaciones de Productores Agropecuarios (Fedeagro) (2013). *Indicadores de la producción por grupos de cultivos*. Recuperado de <http://www.fedeagro.org/produccion/Rubros.asp>.
- Danielson, R. & Sutherland, P. (1986). Porosity. En: A. Klute (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part I: Physical and Mineralogical Methods* (pp. 443-461). Madison: ASA and SSSA.
- Demey, J., Adams, M. & Freitas, H. (1994). Uso del método de análisis de componentes principales para la caracterización de fincas agropecuarias. *Agronomía Tropical*, 44(3), 475-497.
- Durand, J. (2009). Uso de sistemas de información geográfica para el análisis de la vulnerabilidad y selección de los barangays beneficiarios en la región de Bicol, Filipinas. *Cuadernos Internacionales de Tecnología para el Desarrollo Humano*, 8. Recuperado de <http://upcommons.upc.edu/handle/2099/7382>.
- Draye, X., Lecompte, F. & Pagès, L. (2003). Distribution of banana roots in time and space: new tools for an old science. En: D. Turner & F. Rosales (eds.), *Banana root system: towards a better understanding for its productive management* (pp. 58-73). San José, Costa Rica: Inibap, Musalac y Corbana. Recuperado de https://www.bioversityinternational.org/uploads/tx_news/Banana_root_system__towards_a_better_understandingfor_its_productive_management_Sistema_radical_del_banano__hacia_un_mejor_conocimiento_para_su_manejo_productivo_1382.pdf.
- Food Agriculture Organization (FAO). (2004). *La economía mundial del banano 1985-2002*. Roma: FAO. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/007/y5102s/y5102s00.htm>.
- Gallardo, C. (2006). Geoestadística. *Ecosistemas*, 15(3), 48-58.
- Gauggel, C., Sierra, F. & Arévalo, G. (2003). The problem of the banana root deterioration and its impact on production: Latin America's experience. En: D. Turner & F. Rosales (eds.), *Banana root system: towards a better understanding for its productive management* (pp. 13-22). San José, Costa Rica: Inibap, Musalac y Corbana.. Recuperado de <https://www.bioversityinternational.org/uploads/>





tx_news/Banana_root_system__towards_a_better_understandingfor_its_productive_management_Sistema_radical_del_banano__hacia_un_mejor_conocimiento_para_su_manejo_productivo_1382.pdf.

- Gee, G. & Or, D. (2002). Particle-size analysis. En: J. H. Dane & G. C. Topp (eds.) *Methods of soil analysis. Part 4.* (pp. 255-293). Madison: Soils Science Society of America, Book series N° 5.
- Gilabert de Brito, J., López de Rojas, I. & Pérez de Roberti, R. (1990). *Análisis de suelos para diagnóstico de fertilidad. Manual de métodos y procedimientos de referencia.* [Serie A, N° 26]. Maracay, Venezuela: FONAIAP.
- Heanes, D. L. (1984). Determination of total organic-C in soils by an improved chromic acid digestion and spectrophotometric procedure. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 15, 1191-1213.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH). (20 de octubre de 2013). *Estaciones meteorológicas por estado. Aragua.* Recuperado de http://www.inameh.gob.ve/mensual/info_climatologica.php.
- International Network for the Improvement of Banana and Plantain (Inibap). (2006). *Innovaciones tecnológicas para el manejo y mejoramiento de la calidad y salud de suelos bananeros de América Latina y el Caribe.* Informe Técnico Proyecto FONTAGRO ATN/SF-9159 R6 - 2005-2006. Recuperado de: https://www.fontagro.org/wp-content/uploads/2004/01/I_infotec_04_110.pdf
- Jaramillo, D., Anaya, M., Restrepo, C., González, H. & Álvarez, F. (2011). Variables físicas que explican la variabilidad de suelo aluvial y su comportamiento espacial. *Pesq. Agropec. Bras.*, 46(12), 1707-1715.
- Martínez, G. (2009). Situación nacional de las musáceas: breve análisis. *Producción Agropecuaria*, 2(1), 31-44.
- Mehlich, A. (1978). New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.*, 9, 477-492.
- Odeh, I., McBratney, A. & Chittleborough, D. (1992). Soil pattern recognition with Fuzzy-c-means: application to classification and soil-landform interrelationships. *Soil Science Society of America Journal*, 56, 505-516.
- Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanabe, F. S. & Dean, L. A. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate.* [Circular 939]. Washington, D.C.: Department of Agriculture. Recuperado de <https://archive.org/details/estimationofavai939olse>.
- Pla, I. (1983). Metodología para la caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales. *Rev. Fac. Agron. Alcance* N° 32. Maracay.





- Pla, L. (1986). *Análisis multivariado: método de componentes principales*. Washington, D.C.: Instituto Interamericano de Estadística, Sec. General de la OEA.
- Reynolds, W., Elrick, D., Youngs, E., Amoozegar, A., Booltink, H., & Bouma, J. (2002). Saturated and field-saturated water flow parameters. En: J. Dane & G. Topp (eds.), *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods* (pp. 797-878). Madison: Soil Science Society of America.
- Rosales, F., Pocasangre, L., Trejos, J., Serrano, E. & Peña, W. (2008). *Guía de diagnóstico de la calidad y salud de los suelos bananeros*. Roma: Bioversity International.
- Schabenberger, O. & Gotway, C. (2005). *Statistical methods for spatial data analysis*. New York: Chapman y Hall CRC.
- Serrano, E. (2003). Relationship between functional root content and banana yield in Costa Rica. En: D. Turner & F. Rosales (eds.), *Banana root system: towards a better understanding for its productive management* (pp. 25-34). San José, Costa Rica. Inibap, Musalac y Corbana.
- Tukey, J. (1977). *Exploratory data analysis*. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Co.
- Viloria, J. (1984). *Origen de los suelos en la depresión del lago de Valencia*. [Mimeografiado]. Universidad Central de Venezuela, Maracay, Venezuela.
- Viloria, J., Viloria, A., Núñez, H. & Pineda, M. C. (2009). *Cartografía automatizada de unidades de paisaje en relieves montañosos por medio de redes neuronales artificiales*. III Jornadas de Geomática, vol. 3, Caracas, Venezuela. DOI: 10.13140/RG.2.1.5097.1609.

