

EVALUACIÓN AGRONÓMICA CON TÉCNICAS DE
AGRICULTURA DE PRECISIÓN EN PARCELAS DE CAFÉ
(Coffea arabica) EN LA CUENCA DEL RÍO CASTÁN. ESTADO
TRUJILLO

AGRONOMIC EVALUATION WITH TECHNICAL OF
AGRICULTURE OF PRECISION IN COFFEE (Arabic Coffea)
CROP FIELDS IN THE CASTÁN RIVER BASIN. TRUJILLO
STATE

**Francisco Briceño Valera¹, Oswaldo Fernández Torrens²,
Agustín Peña³ y Emelin Faccin**
Universidad de Los Andes, Núcleo “Rafael Rangel”

franciscobricenov@gmail.com, franshe@ula.ve; 2oswalfernan@gmail.com;
3damian1408@hotmail.com

Resumen

En la actualidad, la aplicación generalizada y uniforme de prácticas de manejo a toda un área bajo cultivo viene siendo discutida, porque, en ocasiones ese procedimiento no ha mostrado el uso de insumos más eficiente y más favorable al ambiente y al hombre. El siguiente trabajo tiene el propósito de sugerir alternativas para el manejo efectivo del cultivo de café, en la zona media de la cuenca del río Castán, Municipio Trujillo, Estado Trujillo, mediante el empleo de herramientas de Sistemas de Información Geográfico (SIG) y técnicas de Agricultura de Precisión (AP) se definen espacios pequeños o microparcels con Manejo de Sitio Específico (MSE), dentro de una unidad de mayor tamaño (parcela cultivada), tomando como factor de definición de esos sitios de manejo, a la variabilidad espacial de algunos parámetros de suelo. Es decir, se maneja una microparcels como unidad específica, a la cual se le aplicarán los insumos con un manejo controlado, según las necesidades particulares de cada sección o bloque de terreno. El trabajo se realizó, en dos parcelas cultivadas con café, de aproximadamente 1,5 hectáreas. Para cada parcela se definió una cuadrícula con 123 puntos de muestreo y en cada uno se colectaron muestras de suelo hasta 15 cm de profundidad. Los puntos de muestreo fueron georeferenciados en un sistema de proyección en coordenadas rectangulares UTM. Los resultados del análisis de los parámetros de suelo: pH, Al, CE, contenido de MO, N, P, K, Ca, Mg y Textura fueron procesados con los Software Surf 8 y VARIOWIN, lo cual permitió la obtención y construcción de semivariogramas omnidireccionales y mapas de contorno, para cada parámetro con la visualización de la variabilidad y rango de dependencia espacial que presentan. Entre los resultados de mayor relevancia, se aprecia que los valores de pH, determinan suelos extremadamente ácidos, lo cual es atribuible al lavado de los suelos de montaña, los bajos contenidos de materia orgánica y significativa presencia de aluminio soluble. Esta situación, conduce a definir que el encalado es la primera práctica a efectuar, de acuerdo a los requerimientos por unidad o sitio de manejo, lo cual repercute en la disminución del efecto del aluminio y en el incremento en la absorción de otros nutrientes, facilitando la mejora de las condiciones de suelo y en consecuencia la productividad del cultivo.

Palabras clave: SIG, Agricultura de precisión, geoestadística, manejo de sitio específico

Abstract

Nowadays, widespread and uniform crop field management practices across an area under cultivation are being discussed. Sometimes, those procedures have not proved the most efficient and the most favorable use of inputs to the environment and man. The following approach suggests alternatives for effective coffee crop cultural practices, in the central zone of the Castán River Basin, Municipality

of Trujillo, and Trujillo State. Using tools of geographic information system (GIS) and techniques of precision agriculture (PA), there were defined sites (micro plots) with site-specific management (SSM) within cultivated plots. Spatial variability of some soil properties was taken as a factor to define these management sites. This means that micro plots are treated as specific units which will receive inputs and management practices according to the particular needs of these sites. Two 1.5-Ha coffee crop plots were chosen. Within each plot, a grid with 123 sampling points was defined. Soil samples were collected up to 15 cm deep. Each sampling point was referenced in a rectangular coordinate system or UTM coordinates. Soil parameters: pH, EC, MO, N, P, K, Ca, Mg and texture data were processed with the VARIOWIN and the Surfer 8 Softwares. Omnidirectional semivariogramas and contour maps were created for each parameter. Relevant results show extremely acidic soils because most of the minerals have been leached out of these mountain soils, low organic matter content, and significant presence of soluble aluminum. Therefore, liming was defined as the first treatment to apply according to the requirements for each site. This cultural practice seeks to decrease aluminum effects and increase absorption of other nutrients which would improve soil conditions and consequently crop productivity. Key words: GIS, Precision agriculture, geostatistics, site-specific management.

Recibido: 14-09-2010 / Aprobado: 18-11-2010

INTRODUCCIÓN

Desde que la humanidad inició la práctica de la agricultura como actividad económica, ha tratado de mejorarla con el propósito de incrementar la productividad y reducir los costos de inversión. Pero en muchos casos, la introducción de prácticas de manejo en forma generalizada en las áreas de cultivo no resultan más eficientes y favorables en el uso de los insumos, además de que al darse un tratamiento uniforme a toda la superficie cultivada, se incorpora elementos extraños y contaminantes al medio natural, que se trasladan a cuerpos de agua. Por esta razón, ha surgido la Agricultura de Precisión, la cual es la tecnología que caracteriza a escala muy reducida (microparcels, de unos 10-25 m²) la diversidad del medio físico (tipo de suelo, pendiente, contenido de humedad, contenido de nutrientes, necesidades de fertilización) y del entorno ambiental (infestaciones de malezas y de otras plagas) en el que se desenvuelven los cultivos (Torres y López, 1997). Constituye una alternativa que permite manejar un cultivo a una escala espacial menor a la superficie total de la parcela, es decir ya no se maneja toda la superficie sembrada si no pequeñas porciones de terreno como una unidad específica, esto facilita conocer y proporcionar cada insumo bajo un manejo controlado, según las necesidades particulares de cada pequeña zona (Bragachini y otros, 2005).

Por otra parte, la base de la agricultura de precisión está en la tecnología de Sistemas de Información Geográfica, la cual es una de las herramientas adecuadas para el manejo de información espacial, ya que al usar el modelo de base de datos georrelacional se asocia un conjunto de información gráfica en forma de planos o mapas con bases de datos digitales. Esto quiere decir, que los SIG tienen como característica principal que el manejo de la información gráfica y alfanumérica se realiza de forma integrada, puede abordar de este modo aspectos de alta complejidad relacional en el tema planteado (Barredo, 1996).

SIG es un conjunto de programas de computación que tiene capacidad de almacenar, organizar, analizar y presentar datos espaciales del mundo real para un grupo particular de propósitos (Burrough, 1986). Esta tecnología, sirve para ser utilizada con datos que tengan referencias geográficas, como por ejemplo, un mapa de la variación del pH en una parcela de cultivo y en función de ésta hace una visualización gráfica que facilita la aplicación de las enmiendas necesarias, pero de manera específica en los lugares o sitios donde sea necesario. De esta manera, capas temáticas de tipos de suelo pueden incorporarse a un SIG para luego confeccionar mapas u otras coberturas temáticas que permitan la visualización y análisis de forma integrada de los datos originales más allá del análisis como entidades individuales.

Por otra parte, la Agricultura de Precisión como tecnología de información basada en el posicionamiento satelital, permite que herramientas como los SIG, Sistema de Posicionamiento Global (GPS), computadores, sensores remotos, entre otros, puedan servir para dar a cada zona del campo cultivado, el tratamiento agronómico más apropiado, tanto desde el punto de vista económico-productivo como ambiental, esto permite reducir los costos de producción, aumentar la productividad y uso más eficiente de los insumos (Giorda y Baigorri 1997).

Sobre la base de las consideraciones anteriores, se tiene que los sistemas modernos se pueden aplicar a los campos de cultivo para un tratamiento diferencial, a partir de la variabilidad de los parámetros (contenido de pH, Materia Orgánica, Fósforo, Potasio) del suelo y de disponer de un SIG y un GPS para obtener información que permita definir manejo de sitios específicos. En el caso del Estado Trujillo, el cultivo de café es uno de los principales rubros de aprovechamiento agrícola, se encuentra ubicado en superficies con limitación por pendiente topográfica y relieve accidentado, con problemas de fertilidad por lavado de nutrientes y con degradación del suelo por efecto de la erosión.

En estas áreas geográficas se han realizado estudios, que reportan la pérdida de nutrientes y el efecto en la producción de los cultivos y la contaminación ambiental, en especial sobre el suelo y agua debido a residuos de agroquímicos. El efecto de la erosión sobre la producción de los cultivos está influenciada por las propiedades del suelo y particularmente por la capacidad de retención de agua y el manejo a que son sometidas las plantaciones. Asimismo, la pérdida de la capa superficial del suelo disminuye el contenido de materia orgánica, disminuye la disponibilidad de nutrientes e incrementa la presencia de aluminio intercambiable por efecto de lavado de sales, con la consecuente variación de pH, lo cual afecta el desarrollo del cultivo.

Con base en lo anterior, el presente trabajo tiene el objetivo sugerir alternativas para el manejo del cultivo de café, en la zona media de la cuenca del río Castán, Municipio Trujillo, Estado Trujillo, mediante el empleo de herramientas de SIG y técnicas de AP, para definir espacios pequeños o microparcels para MSE, tomando como factor de definición de esos sitios de manejo, la variabilidad espacial de algunos parámetros de suelo.

ANTECEDENTES

La cuenca del río Castán forma parte del Municipio Trujillo, la cual escurre al Suroeste del estado Trujillo, hasta unirse con el río Mocoy en el sector La Plazuela, lleva sus aguas al Río Motatán, que a su vez corresponde a la Hoya Hidrográfica del Lago de Maracaibo. Tiene una superficie aproximada de 11.526 hectáreas, estando dentro de ella la ciudad de Trujillo, capital del estado Trujillo. La cuenca del Castán, se inicia a una altura de 3.200 m.s.n.m., entre el Páramo El Atajo y el Páramo de Ortiz, en la divisoria de aguas con la cuenca del río Boconó, tiene pisos altitudinales que varían hasta los 570 m.s.n.m. en el sector La Plazuela, donde confluye con el río Mocoy, luego de un recorrido de 22,3 kilómetros, atravesando un paisaje modelado por la variabilidad climática que va desde el bosque seco tropical hasta el bosque muy húmedo montano y que es condicionado por los vientos del noreste que penetran por encima de la Sierra de Jirajara, descargando parte de su humedad. También, el clima del área esta determinado por la evaporación del Lago de Maracaibo, que al desplazarse hacia el sureste provoca nubosidad la cual al entrar en contacto con los fríos páramos, genera precipitaciones locales en las zonas centrales del estado Trujillo (Hernández, 1988).

En lo específico, en la subcuenca del Castán las precipitaciones están concentradas en dos periodos anuales y son el resultado de la convergencia intertropical mencionada, lo que hace que las lluvias sean por lo general intensas y productoras de abundante escurrimiento e infiltración. Procesos que se dan, en superficies con presencia de saprolitos y predominantes fuertes pendientes, con intervención y ocupación urbana-semiurbana del territorio lo que se

expresa en una cobertura vegetal muy rala y una fuerte canalización del escurrimiento, Roa (2007). Tal situación, hace al área de la ciudad de Trujillo y sus alrededores susceptible a problemas de deslizamientos de los tipos: caídas/ volcamiento de rocas o derrumbes; flujos de detritos; deslizamientos transicionales y/o superficiales; y deslizamientos rotacionales y/o profundas.

La geología presente en la zona, corresponde al Precámbrico y a los períodos Carbonífero, Triásico, Jurásico, Cretáceo medio inferior y superior hasta lo más reciente del Pleistoceno. (Albornoz, 1993). Esto hace que el territorio de la subcuenca del río Castán esté influenciado por la cercanía a las zonas de fallas que se localizan en el sector Árbol Redondo, que junto con las fallas de Trujillo y El Zamuro, han sido probablemente las responsables de la gran actividad sísmica que históricamente ha afectado toda la región.

La unidades rocosas que predominan en el área de la subcuenca del río Castán y sus adyacencias se reconocen como filitas, filitas pizarrosas, cuarcitas y metalimonitas de la Formación Mucuchachí (Paleozoico Superior), que presenta una secuencia plegada y de moderada a débilmente meteorizada, que unido a los altos valores de pendiente topográfica, característico de la región natural del páramo de Trujillo, donde predomina un sistema de relieve masivo y en menor proporción periglaciario, se tienden a desarrollar deslizamientos. Por esta razón, este territorio es altamente susceptible a generar sistemas de cárcavas y a presentar vulnerabilidad al escurrimiento superficial, lo cual contribuye al aporte de significativos volúmenes de sedimentos en los cauces, lo cual hace que la mayor parte de las superficies tengan condiciones de desequilibrio, por causas o factores pasivos relacionados con agentes geológicos/litológicos y de pendiente topográfica. Es así que dada la esquistosidad y buzamiento de las unidades litológicas, favorables a la meteorización química y mecánica, se determina en gran medida la existencia de un saprolito propenso a la inestabilidad, (Ferrer, 1984)

Por otra parte, el área de estudio presenta suelos medianamente desarrollados, de texturas en su mayoría francas, pH ácido, mediano contenido de nutrientes y de media a baja fertilidad natural. Los mismos se ubican entre las Capacidades de Uso agrícola de Clases V, VI y VII, poseen potencialidades aptas para la producción de cultivos especiales como café en sotobosque, plantas ornamentales y frutales, siempre que se de la aplicación de un manejo apropiado de suelos y aguas. Asimismo, los suelos pueden ser utilizados con pastos y bosques. La clase VIII se encuentra en las zonas montañosas de la subcuenca, pero aún cuando debe ser destinada exclusivamente para la conservación de recursos naturales, esta sometida a intervención incontrolada con usos inapropiados a las condiciones ambientales presentes, Barreto (2006).

La vegetación arbórea presente en la zona, está representada principalmente por individuos con desarrollo considerable, de alturas que van desde 7 a 25 metros, con especies de bosque deciduo y siempre verde. Las formaciones boscosas, se localizan en toda la subcuenca, siempre aledaños a vertientes y cursos de agua y se pueden clasificar como bosques medio y bajo con diferentes grados de cobertura y densidad, (Rojas 2005). No obstante, la vegetación natural en el área presenta una avanzada intervención por efecto del establecimiento de actividades agrícolas, la cual es crítica en superficies con fuertes pendientes. Asimismo, la tala incontrolada y los incendios forestales, consumen amplias superficies, ocasionando daños a la flora y la fauna y contribuyendo a la degradación de suelos.

La capacidad agrologica junto con la pendiente topográfica y disponibilidad de agua para riego son los criterios más condicionantes en la zonificación de la subcuenca del río Castán. Este espacio geográfico, tiene severas limitaciones para el desarrollo actividades agropecuarias teniendo un 63,75% con adecuabilidad nula, 36,74% adecuabilidad media y sólo el 0.51% del área total presenta adecuabilidad alta, (Castellanos y Hernández, 2001).

Como parte de la vegetación presente en el área de estudio, el cultivo de café a pesar de ser un cultivo perenne, cuando se establece en superficies con altas pendientes topográficas y sin sombra, resulta en un creciente aporte de sedimentos y pérdida de nutrientes, esto lo afirma Arellano (2000) en investigación realizada en la microcuenca Quebrada de Ramos, tributaria del Castán, donde se midió la pérdida de nutrientes junto con sedimentos de la erosión de tres agro ecosistemas de café, y un testigo que fue en barbecho, se utilizaron parcelas de erosión con pendientes entre 35 y 42% resultando que en orden decreciente la pérdida de suelo es: Café sin sombra; café con sombra; Café con frutales; barbecho. También, se midió la pérdida de nutrientes evidenciándose la pérdida en forma creciente de los elementos Calcio, Nitrógeno, Magnesio, Potasio y Fosforo en los agro ecosistemas analizados.

En relación a la aplicación de las herramientas de geoestadística en estudio de variabilidad espacial de propiedades del suelo en cultivos en el estado Trujillo, por ejemplo, Fernández (2005), realizó un estudio para determinar la variabilidad espacial y uso del manejo sitio específico de la fertilidad del suelo, en cultivo de caña de azúcar, en Monay, Estado Trujillo. Este trabajo reporta la variabilidad espacial de los suelos en dos tablones cultivados con caña de azúcar y en el determina como ésta variabilidad se refleja e influye en los rendimientos de este cultivo; en efecto encontró que el coeficiente de variación para las variables conductividad eléctrica (CE) y potasio (K) es mayor del 65% lo cual indica que hay una gran variabilidad entre ellas. Asimismo, Fernández (2005) señala que desde el punto de vista geoestadístico, el Nugget (varianza al azar), se presenta en menor proporción con respecto a la varianza espacial en la mayoría de las variables analizadas, lo cual indica que hay una marcada dependencia espacial de estas variables en el suelo. El comportamiento espacial de las diferentes propiedades de los suelos analizados tiene estrecha relación con su génesis y con el efecto de manejo agronómico al cual han sido sometidos los mismos durante su aprovechamiento y esto se refleja en el rendimiento de este cultivo a nivel de parcelas.

ANÁLISIS GEOESTADÍSTICO

El procedimiento utilizado para la realización de este trabajo, se basó en el uso de un análisis geoestadístico, que consiste en la aplicación de una serie de técnicas estadísticas que permiten analizar variables regionalizadas (Matheron 1963). La geoestadística, es una disciplina que se ocupa del estudio de la distribución de valores en el espacio, lo cual es de utilidad para los estudios de ingeniería de minas, geología, edafología y otras ciencias de la tierra y del ambiente.

El análisis geoestadístico está basado en tres conceptos fundamentales: Variables Regionalizadas, Funciones al Azar y Estacionalidad, los cuales han sido discutidos por varios autores (Matheron, 1975; Olea, 1975; Ovalles, 1994 y Webster, 1985). De esta manera, el análisis geoestadístico se basa en la dependencia espacial que existe entre observaciones, mientras más cercanas estén las muestras, serán más similares y a mayor distancia de separación las observaciones serán menos similares.

El desarrollo de la teoría estadística ha facilitado la interpretación de las relaciones existentes entre muestras, permite cuantificarlas y usarlas para interpolar o transferir valores en localidades no muestreadas. Este desarrollo, se basa en la teoría de las Variables Regionalizadas (Matheron, ob cit), una variable regionalizada es una función que describe un fenómeno natural geográficamente distribuido (Olea 1977), el cual se caracteriza por su localización, definida por un valor numérico asociado a una unidad de muestreo, con un tamaño, forma y orientación definidos, conocidos en conjunto como el soporte geométrico. De igual manera, otra característica es la anisotropía, referida a los cambios de las variables en diferentes direcciones y; la continuidad, en referencia a la variación de las variables regionalizadas, la cual puede ser muy alta o muy baja, dependiendo de las características del área estudiada, pero independiente de esto, existe un promedio de continuidad de la variable en el espacio.

La tasa de cambio promedio de las variables regionalizadas puede ser estimada con la semivarianza. La semivarianza es una medida de la similitud que existe entre observaciones situadas a una determinada distancia y donde mientras más similares sean las observaciones, menor es la semivarianza.

El desarrollo de la teoría de las variables regionalizadas y su incorporación a los estudios de suelo, ha permitido incorporar herramientas estadísticas que ayudan a evaluar e interpretar buena parte de los problemas de variabilidad espacial que tienen los suelos en sus condiciones de fertilidad, lo cual ha mejorado los resultados que se obtienen en la investigación. De esta manera, cuando el valor que toma una variable en un sitio depende de la distancia y/o la dirección a la cual se ubica de otro sitio vecino, se tiene una variable con dependencia espacial. Y, cuando una variable presenta dependencia espacial, durante el muestreo se puede violar el principio de la independencia entre las muestras y los procedimientos de la estadística paramétrica clásica no resultan adecuados para su interpretación. Es por esto que, para el estudio de este tipo de variables se tiene un grupo de herramientas estadísticas conocidos como “Geoestadística” o “Estadística Espacial”.

Es así como, la conceptualización y definición de variables regionalizadas, proveen las bases teóricas para el análisis de dependencia espacial, utilizando la autocorrelación o los semivariogramas, que son gráficas que representan los valores de semivarianza que adquiere la variable en relación con el espaciamiento entre muestras. Un semivariograma es un variograma aproximado que expresa la varianza de los diferentes valores de una propiedad entre pares de puntos separados por una distancia, la cual puede ser estimada mediante la siguiente relación:

$$\gamma(h) = 1/2N \sum_{i=1}^N [Z(x) - Z(x+h)]^2$$

Donde:

$$\gamma(h) = \text{Semivarianza.}$$

N = Números de pares.

Z(x) = Valor del atributo en el lugar (x).

Z(x + h) = Valor del atributo a una distancia (h) del lugar (x).

Para el caso en que hay N(h) pares de muestras, un diagrama de semivarianza en relación al intervalo (h) para una dirección dada es representado por el semivariograma. Para el análisis de semivarianza es necesario que el grupo de datos esté en una distribución normal y de estacionalidad, es decir, que para todas las distancias la varianza de las diferencias de valores en las posiciones definidas sea finita e independiente de la posición. Al respecto, (Burrough 1993) ha encontrado que la no estacionalidad en los datos no afecta de manera significativa el análisis de varianza, por el contrario, la semivarianza es más sensible a las distribuciones asimétricas de los datos y a las tendencias que a la no estacionalidad.

El procedimiento básico para el análisis de semivarianza se inicia con la definición de distancias de muestreo; realización del muestreo de manera cuidadosa a manera de no confundir muestras; referenciación de cada muestra mediante un sistema de coordenadas (X,Y) y; construcción de una base de datos con los parámetros de coordenadas, distancias y propiedades. Luego de construida la base de datos, se realiza un análisis exploratorio con el fin de comprobar la distribución normal o por lo menos que no tenga asimetría; detectar valores anómalos o extremos y; comprobar que no hay tendencias.

A continuación, se obtiene el semivariograma y se analizan sus características.

Luego de obtenida la distribución de puntos en el semivariograma, esta se ajusta a un modelo teórico, que de acuerdo a (Burrough 1992), se pueden ajustar a dos grandes grupos: Transicionales, aquellos en los cuales la semivarianza se incrementa al aumentar el espaciamiento entre muestras, llegando hasta un cierto valor de distancia a partir de la cual la semivarianza se estabiliza y; No Transicionales, aquellos en los cuales la semivarianza crece simplemente al aumentar la distancia de muestreo, sin estabilizar su valor dentro de la mayor distancia de espaciamiento entre muestras analizadas.

Un semivariograma experimental puede tomar diferentes formas (Figura 1), lo cual depende de la información y del intervalo de muestreo usado. Sin embargo, es de esperar que la semivarianza aumenta con la distancia de separación entre las muestras, ascendiendo hasta llegar a un valor más o menos constante llamado “sill” o umbral, ubicado a una distancia de separación dada, que se denomina el rango de dependencia espacial. El umbral o sill se aproximará a la varianza de la muestra S^2 , si la información es estacionaria. De esta manera, aquellas muestras separadas por una distancia más corta que el Rango de Dependencia Espacial (RDE) están espacialmente relacionadas, mientras que aquellas que estén separadas por distancias mayores, no lo están, porque en este caso la semivarianza es igual a la varianza, mostrando que la covarianza espacial $C(h)$ es nula, es decir, las propiedades no guardan relación con la distancia, y se manifiesta una variación mayormente al azar.

El rango del semivariograma dependerá de la escala de observación y de la interacción espacial de los factores y procesos formadores del suelo que afectan a cada propiedad según la escala de muestreo usada. Sin embargo, la semivarianza puede incrementarse sin presentar un rango y un Sill definitivo, esto sucede por el efecto de tendencias y de no estacionariedad (Webster y Burgess 1980, citado por Fernández 2005). Asimismo, otros semivariogramas pueden presentar una ausencia total de relación espacial estructural o sistemática, indicando que no hay relación espacial cuantificable entre las muestras a una determinada escala.

De manera experimental, un semivariograma ideal podría pasar por el origen cuando la distancia de separación de las muestras sea cero. No obstante, algunas propiedades del suelo no tienen una semivarianza cero cuando la distancia h tiende a cero. La varianza distinta de cero, es denominada “Varianza Nugget”, “Efecto Nugget” o al azar, esta es una varianza no explicada o “random” (azar), que puede ser generada por error en las mediciones en campo, en el laboratorio, o por la microvariabilidad de la propiedad no detectada por la escala de muestreo.

La Varianza Nugget puede también expresarse como un porcentaje del valor del sill, para comparar el tamaño relativo del efecto nugget con la varianza estructural o sistemática entre propiedades. Una varianza nugget del 0% es un valor insignificante del sill, lo que indica que no hay errores significativos en la varianza a cortas distancias. Sobre la base de lo anterior, Cambardella et al (1994), establecieron tres categorías para agrupar la importancia de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, de acuerdo con el porcentaje que representa el Nugget en el Sill, de la siguiente manera:

- Fuerte dependencia espacial: Nugget < 25 %
- Moderada dependencia espacial: Nugget entre 25 y 75 %.
- Débil dependencia espacial: Nugget >75 %

También, un semivariograma experimental puede exhibir solo efecto Nugget (100% del sill) cuando la semivarianza (h) es igual para todos los valores de (h). La ocurrencia de este efecto nugget puro, se debe a una alta variación en cortas distancias de separación, lo

cual indica que no hay correlación espacial en la escala del muestreo. Y de igual manera, si se disminuye la escala de muestreo, puede revelarse la estructura del efecto aparentemente al azar (Burrough, 1987, citado por Fernández 2005).

Por otra parte, si los procesos dominantes de la génesis del suelo ocurren en rangos cortos, el semivariograma mostrará una gran varianza Nugget. Ahora bien, si estos procesos ocurren en grandes rangos, el semivariograma es lineal hasta llegar al sill, donde se aplanan. No obstante, si varios procesos contribuyen por igual a una misma escala, el semivariograma constará de un grupo de líneas rectas que se aproximan a una curva. En este caso, es muy difícil identificar la contribución parcial de cada proceso.

Pero, las propiedades del suelo presentan variabilidad espacial en diferentes rangos y cuando se quiere conocer esta variabilidad con fines de manejo de suelos, es más importante la variabilidad de rango corto; y la de rango largo es más útil para entender lo que es la pedogénesis y/o geogénesis del suelo como lo señala (Yost et al 1982, citado por Jaramillo 1995).

Otro aspecto fundamental de la semivariografía es la definición del tipo de dependencia espacial que presenta la variable que se analiza. Cuando la variabilidad espacial de la variable depende sólo de la distancia de separación entre muestras el semivariograma que se obtiene es Isotrópico. Mientras que, cuando la variabilidad depende además del espaciamiento, tiene dependencia de la dirección en que se muestrea, en este caso, el semivariograma es Anisotrópico. La anisotropía muestra que, los procesos o factores que controlan la variabilidad de determinada propiedad, se dan de manera diferencial de acuerdo con ciertas direcciones.

De esta manera, los parámetros de los semivariogramas pueden ser estimados usando la técnica estadística de regresión por mínimos cuadrados, considerando el número de pares en cada intervalo (Vieira et al 1981; Yost et al 1982, citados por Fernández (2005). Esta técnica permite una adecuada aproximación del modelo de semivariograma apropiado, la cual puede ser obtenida en su estructura definitiva mediante la revisión exhaustiva de la información de cada una de las propiedades del suelo.

Por otra parte, los modelos teóricos de semivariogramas que más frecuentemente se usan en estudios de suelos son: Lineal con Sill, Esférico, Exponencial y Gaussiano, en los transicionales y el lineal en los no transicionales (Figura 2).

Al momento de aplicar algún modelo para estimar el semivariograma, es importante elegir el más apropiado, dado que cada uno de ellos arroja valores diferentes para la varianza del Nugget y para el RDE. En este caso, se utilizó el modelo esférico por que al igual que los modelos gaussiano y exponencial, facilita el manejo e interpretación adaptable al software VARIOWIN - 1996

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo fue realizado sobre dos parcelas cultivadas con café, están ubicadas en el piso altitudinal entre 1450 y 1500 msnm, dentro de la cuenca del Río Castán tienen una superficie aproximada de 1,5 hectáreas. La parcela 1, presenta valores de pendiente topográfica menores de 30% y la parcela 2 valores entre el 20 y 50 %.

Los datos de campo levantados, consistieron en ubicar puntos de muestreo referenciados utilizando un sistema GPS y una estación total topográfica marca SOKKIA set 600. Se levantaron, en cada parcela un promedio de 123 puntos de muestreo, en cada punto se tomaron muestras de 0 a 15 cm de profundidad, se llevaron al Laboratorio de Análisis de Suelos del NURR, ULA, donde se realizaron los siguientes análisis: pH en agua 1:2 (Método Potenciométrico), CE (Método del Conductímetro), MO y Nt (Método de Walkley y Black), P (Método Colorimétrico de Olsen), K (Método Colorimétrico de Bray), Ca y Mg (Método

Complexométrico), el Al intercambiable (Método de Extracción KCl 1N) y Textura (Método de Bouyoucos), esto facilitó la elaboración de mapas de contorno mediante la interpolación "kriging", utilizando el programa computarizado Surfer 8 (1999), que permitió comparar y analizar espacialmente los diferentes parámetros del suelo (contenido de pH, Al, CE, MO, N_T, P, K, Ca, Mg, a, L, A), para determinar la variabilidad espacial, basándose en los componentes geoestadísticos obtenidos en los Semivariogramas Omnidireccionales (Nugget, Rango, Sill y V.E).

RESULTADOS

Los semivariogramas omnidireccionales muestran que los modelos predominantes en ambas parcelas tienden a comportarse como el modelo ideal (Figura 1 esférico gaussiano), en la parcela 1 prevalece el efecto azar y espacial de manera conjunta; por el contrario, en la parcela 2 las variables contenido de Al, Ca, P, tienen una varianza al azar menor del 25%, mientras que el resto de las variables muestran un efecto similar en las dos parcelas (Figuras 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 y 19).

De esta manera, el rango de valores del parámetro pH fue similar en ambas parcelas (Figura 3), entre 3.05 a 4.7, pero la distribución espacial de esta propiedad en ambas parcelas no fue similar. Por ejemplo, los valores de pH entre 3.05 y 3.55 están presentes en un área mayor en la parcela 1), con niveles no adecuados para el cultivo. Asimismo, los semivariogramas omnidireccionales de pH, P y Mg, muestran que en la parcela 1 se presenta un rango de dependencia espacial menor que la parcela 2. La explicación de este fenómeno es posible que se deba a la pendiente topográfica que genera que en superficies planas, haya mayor pedogénesis que en las superficies inclinadas (Figuras 15, 16 y 17).

Con respecto a la variable contenido de Aluminio (Al) (Figura 4) la distribución en las dos parcelas es muy diversa; sin embargo presentan problemas con el Al, esto está asociado a la alta acidez, ya que cuando el pH está por debajo de 4 el Al tiende a solubilizarse y se transforma en Al intercambiable (Al⁺⁺⁺), el cual es perjudicial para la planta por que limita las posibilidades de absorción de otros nutrientes. También, cuando el pH esta por arriba de 4, el Al se combina con los iones fosfato (PO₄⁻⁻⁻) y ortofosfato (H₂PO₄) para formar los fosfato de aluminio y los ortofosfato de aluminio y de esta forma, el fósforo no puede ser absorbido por la planta. Se puede concluir que cuando el aluminio intercambiable es menor de 0.5 Cmol/Kg de suelo, es aceptable para el desarrollo normal de los cultivos, la parcela 1 se encontró mas critica, aunque ambas deben ser tratadas por presentar problemas con el Al.

En cuanto a la distribución espacial de la Conductividad Eléctrica (CE) del suelo, en ambas parcelas se encontró entre valores de 0 a 0.5 dS/m, lo cual según la tabla de interpretación de los valores está en un rango normal, no afecta el cultivo debido a que no hay sales en exceso. Por el contrario, se presenta es déficit de bases (Ca, K y Mg).

En la Figura 5 se observa la distribución (%) de la Materia Orgánica (MO) en el suelo, la cual en la parcela 1 se encontró mas estabilizada debido a que la pendiente es menor de 30%, caso contrario sucede en la parcela 2 que por tener pendientes entre 20 y 50% el contenido de MO fue más bajo, ya que ésta es un coloide orgánico que puede ser lavada o removido con facilidad del suelo por las aguas de lluvia. En conclusión la parcela 1 necesita una cantidad menor de MO que la 2. Asimismo, los semivariogramas omnidireccionales (Figura 11), muestran que el comportamiento del rango de dependencia espacial en la parcela 1 es más grande, lo que se explica en los cambios rápidos generados por la pendiente topográfica superior en la parcela 2.

La distribución espacial del Nitrógeno (N_T) lo podemos observar en la (Figura 6), está íntimamente relacionado con el contenido de MO debido a que el nitrógeno total es igual a la MO por el 5%, esto quiere decir que el 5% de la MO es N_T y de éste sólo el 1.5% se

encuentra disponible para ser absorbido por la planta ($N_{\text{Disponible}} = N_T \times 0.015$), una de las principales causas que impide la absorción del nitrógeno es la falta de humedad en el suelo,. Para el caso, se tiene que en ambas parcelas existe baja disponibilidad de N, mostrándose que la situación de la parcela 2 fue más crítica.

En la (Figura 7) se muestra la distribución espacial del fósforo (P) contenido en el suelo, fue similar en ambas parcelas, con valores entre 0 y 15 ppm, lo cual indica una baja presencia de P soluble en el suelo. Esta situación es el resultado de la combinación de los factores pH, el contenido de Hierro y Aluminio en el suelo, los cuales insolubilizan el fósforo. Por otra parte, también ocurre que el abonamiento excesivo con nitrógeno puede provocar un desbalance nutricional que origina deficiencia de fósforo. Por lo tanto, se sugiere que para aumentar el contenido de P en las dos parcelas, es necesario primero corregir el pH aplicando encalado.

En la (Figura 8) se muestra la distribución espacial del Potasio (K), presenta un comportamiento similar en ambas parcelas, predominan valores de 0 a 180 ppm, que según la tabla de interpretación de los valores es bajo. Es importante señalar, que pocas veces se observan deficiencia de K en los suelos con cafetales, posiblemente por la continua liberación de K que ocurre en ellos. Sin embargo, por el alto consumo de K para la formación de los frutos, cuando la fertilización potásica es deficiente, el cafeto consume las reservas y ocurre deficiencia. En este caso particular se debe suministrar para aumentar su presencia en el suelo.

En la Figura 9 se presenta la distribución espacial del contenido de calcio (Ca), se encontraron valores muy bajos (de 0 a 600 ppm), lo cual está relacionado en forma directa con la excesiva acidez de los suelos, las altas concentraciones de Al y la baja disponibilidad de Mg en la solución del suelo. Por ello, la primera recomendación que surge es corregir los déficit de calcio, con la incorporación carbonato de calcio, a través del encalado. De igual manera, los semivariogramas omnidireccionales de la variable Ca, al igual que la conductividad eléctrica (CE), tienen un comportamiento del rango de dependencia espacial mayor en la parcela 1. Esto se explica por el efecto de la pendiente sobre el comportamiento espacial de estas variables, en la parcela 2 que presenta valores de pendiente más altos, los valores difieren en forma brusca a corta distancia (Figuras 12 y 14).

En la Figura 10 se tiene la distribución espacial del contenido de Magnesio (Mg), en la parcela 1 predominaron valores de 0 a 180 ppm, que según la tabla de interpretación de los valores está en el nivel crítico. En la parcela 2, predominaron valores mayores a 180; sin embargo se recomienda tratar ambas parcelas para aumentar su contenido en el suelo. Los semivariogramas omnidireccionales para esta variable, también evidencian el efecto que tiene la pendiente sobre el rango de dependencia espacial (Figura 17).

CONCLUSIONES

En forma general el tipo de variabilidad espacial que predomina en ambas parcelas estudiadas tiene un efecto combinado de variabilidad espacial y al azar, los cuales están ligados al efecto de la pendiente y a la pedogénesis que ocurre en estos suelos.

A pesar de que las variables pH, contenido de MO, N_T , P, K, Ca y Mg se representan con varios rangos, están en niveles muy bajos. Esto evidencia que estas variables afectan en forma negativa el desarrollo del cultivo en las parcelas estudiadas. Esto resulta ser una fuente útil para generar propuestas de manejo que permitan la adecuación de los parámetros del suelo para un mejor desarrollo y productividad del cultivo.

Debido a que los rangos de las variables analizadas, están condicionados por carencias se sugiere la aplicación de enmiendas de manera general sobre toda la superficie de cultivo, sin tomar en cuenta las pequeñas variaciones que se muestran en los mapas.

Se sugiere la aplicación de cal dolomítica (CaMgCO_3) la cual ayudará a la incorporación de Ca y Mg y a mejorar el pH en ambas parcelas, debido a que ésta variable genera mayor condicionamiento en el desarrollo del cultivo.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico (CDCHT) de la Universidad de Los Andes por el apoyo financiero para la realización de la presente investigación, la cual se desarrollo como proyecto identificado con el código: **NURR-C-448-06-01-B**

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- ALBORNOZ, J. *Estudio Preliminar de Suelos de las Subcuencas Ríos Castán – Mocoy Estado Trujillo, Nivel preliminar Escala 1:50.000*. Ministerio del Ambiente y de Recursos Naturales Renovables. División de Investigación Aguas, Suelos y Vegetación. Trujillo Región 19. 1993
- ARELLANO, R. *Perdida de suelo y nutrientes en agroecosistemas de café en la subcuenca del río Castán, Trujillo – Venezuela*. Universidad de los Andes, Núcleo Universitario “Rafael Rangel” Villa Universitaria Departamento de Ingeniería, Grupo de Investigación de Suelos y Aguas, Trujillo – Venezuela. 2000
- BARREDO, J. *Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio*, Editorial RA-MA, Madrid, 1996
- BARRETO, E. *Caracterización Físico – Natural de la Zona Protectora de la Ciudad de Trujillo con fines de Ordenamiento Territorial – Ambiental*. Universidad de Los Andes. Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Agrícola. Trujillo – Venezuela. 2006
- BRAGACHINI, M; MENDEZ, A.; SCARAMUZZA, F. y PROIETTI, F. Proyecto de agricultura de precisión. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Argentina. 2005.
- BURROUGH, P. Principles of geographical information systems for land resources assessmen. Clarendon Press Oxford Oxfordshire and New York.. Vol. 12. 1986
- BURROUGH, P. Soil variability: a late 20th century view. *Soils and Fertilizers*, 56 (5): 529-562. 1993
- BURROUGH, P. Sampling desings for quantifying map unit composition. En : *Spatial variabilities of soils and landforms*.SSSA Special publication N° 28. 2ª Ed.SSSA. Madison.pp: 89-125. 1992
- CAMBARDELLA, C., MOORMAN, J., NOVAK,J., PARKIN, T., KARLEN, D., TURCO, R., and KONOPKA, A. Field-scale variability of soil properties in Centro Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1501-1511. 1994
- CASTELLANOS, E. y HERNÁNDEZ, J. Evaluación de la Ejecución del Proyecto Piloto de Rehabilitación y Conservación de la Micro cuenca Quebrada de Ramos, Parroquia Chiquinquirá, Municipio Trujillo, Estado Trujillo. Universidad de Los Andes. Trabajo de Grado para optar al título de Ingenieros Agrícola. Trujillo Venezuela. 2001
- FERNANDEZ, O. Variabilidad espacial y uso del manejo sitio específico de la fertilidad del suelo, en cultivo de caña (*Saccharum officinarum*) en Monay, estado Trujillo. Trabajo de ascenso a la categoría de profesor Titular, presentado en la Universidad de Los Andes. Núcleo Universitario “Rafael Rangel”. Trujillo. 2005

- FERRER, C. Un enfoque metodológico para la evaluación de la estabilidad relativa de los terrenos en la conurbación Valera – Trujillo (Andes Venezolanos): la ciudad de Trujillo y sus alrededores como caso especial de estudio. ULA. Instituto de Geografía y Conservación de Recursos. Mérida. 1989
- FONAIAP. Manual de Laboratorio para análisis de suelo. FONAIAP, Maracay (Venezuela). 1990
- GARCÍA, N. Cafetales y Café. Dirección de Ediciones de la Dirección General de Información del Sector Agropecuario del Ministerio de Agricultura y Cría. Caracas Venezuela, 1988.
- GIORDA, L. y BAIGORRI, H. El cultivo de la soja en Argentina. Agro de Córdoba 4. INTA C. R. Córdoba - EEA Marcos Juárez - EEA Manfredi. editar. San Juan. Argentina. 448 pp. 1997
- HERNÁNDEZ, R. *Zonificación Agroclimática del Estado Trujillo*. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables. Volumen I A. Caracas – Venezuela. 1988
- JARAMILLO, D. Andisoles del oriente antioqueño. Caracterización química y fertilidad. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 35 p. 1995
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. *Economical Geology* 58, 1246. 1963
- MATHERON, G. Les Concepts de Base et L'Evolution de la Geostatistique Miniere. NATO A. S. I. Rome, Italie, 13-25 Octobre. 8 p. 1975
- OLEA, R. Optimun mapping techniques using regionalized variable theory. Series on spatial analysis N° 2. University of Kansas, EEUU, 137 pp. 1975
- OLEA, R. Measuring spatial dependence with semivariograms. Kansas Geological Survey, Lawrence. 29 p. (Series on Spatial Analysis, N° 3). 1977
- OVALLES, F. Métodos estadísticos para evaluar la variabilidad de suelos dentro de unidades de capacidad de uso en la depresión del Lago de Valencia. *Agronomía tropical*. N° 44(1). 1994
- ROA, J. Aproximación al mapa de susceptibilidad y amenazas por deslizamiento de la ciudad de Trujillo. Venezuela. *Revista AGORA*, N° 017, Trujillo, Venezuela. 2007
- ROJAS, Y. *Levantamiento Estructural de la Montaña “El Humo”, Cuenca Alta del Río Castán*. Trujillo – Venezuela. Universidad de Los Andes. Trabajo de Grado para optar al título de Técnico Superior Agrícola. Trujillo – Venezuela. 2005
- TORRES, L. y F. López G. Perspectivas de la Agricultura de Precisión y su relación con la Agricultura de Conservación. *Revista Riegos y Drenajes XXI*, N° 101. Instituto de Agricultura Sostenible CSIC, Cordoba, España. 1997
- WEBSTER, R. Quantitative spatial analysis of soil in the field. *Advances in Soil Science*, 3, 1-70. 1985

Figura 1. Modelo Semivariograma Omnidireccional

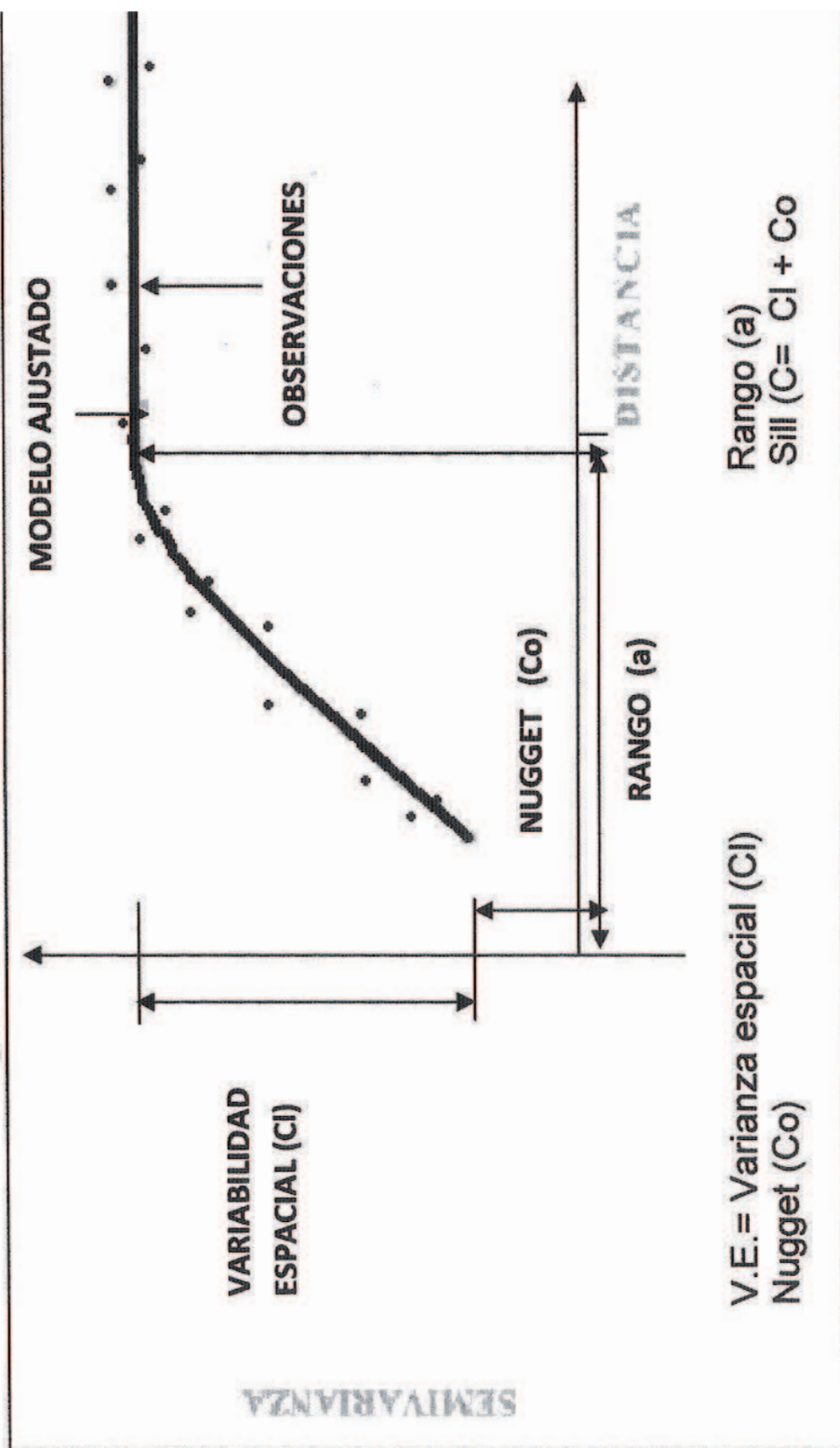


Figura 2. Modelos teóricos de semivariogramas

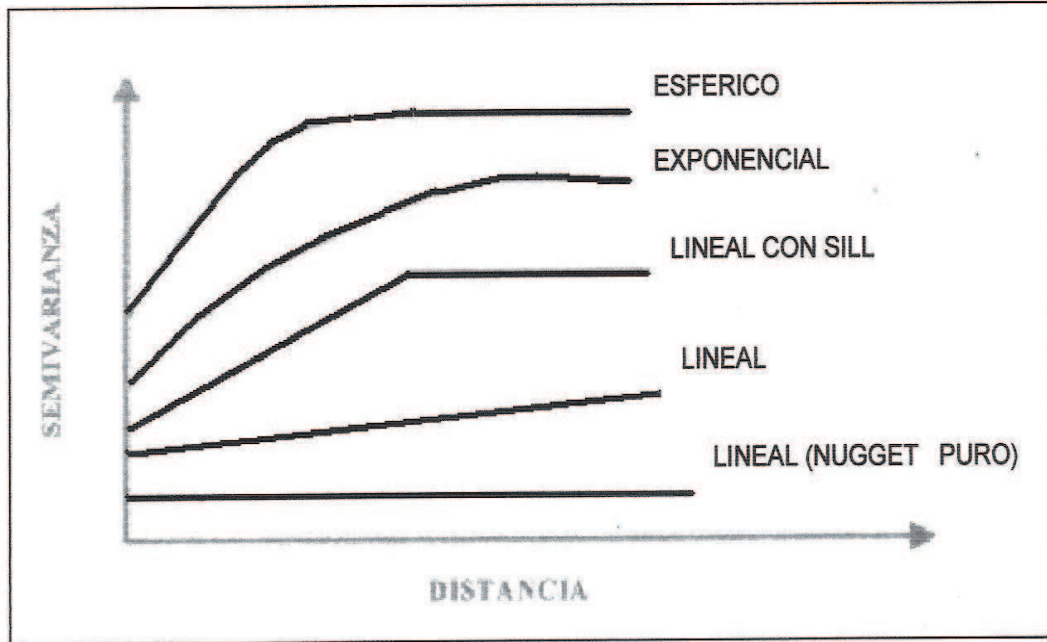


Figura 3. Mapa de contorno de la distribución del Ph

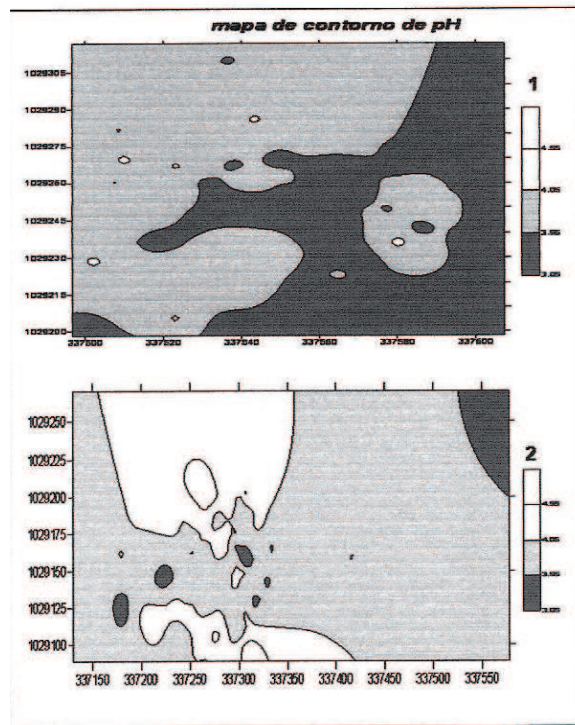


Figura 4. Mapa de contorno de la distribución del Aluminio (Al)

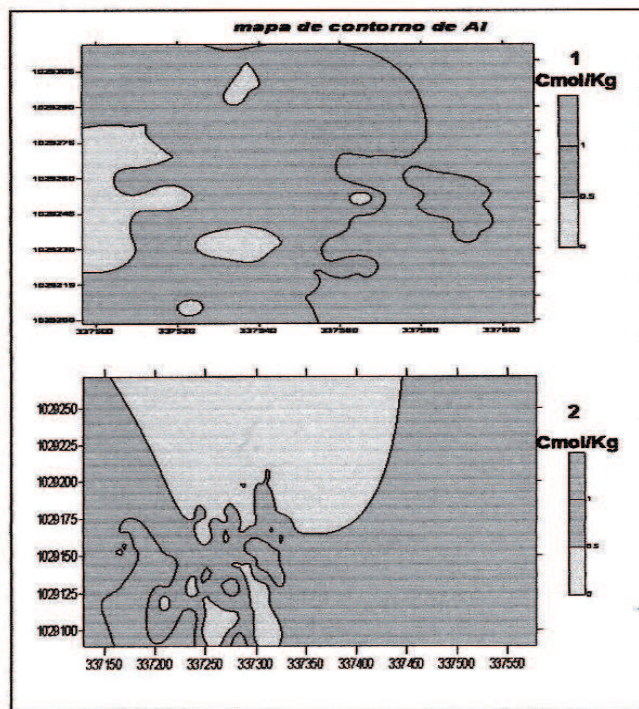


Figura 5 Mapa de contorno la distribución de Materia Orgánica (MO)

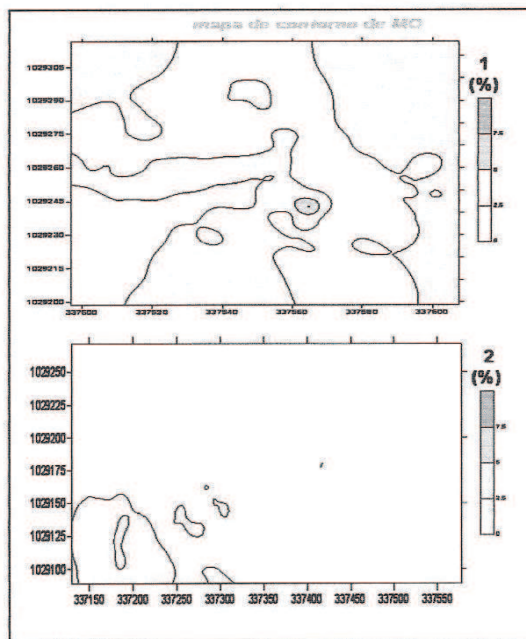
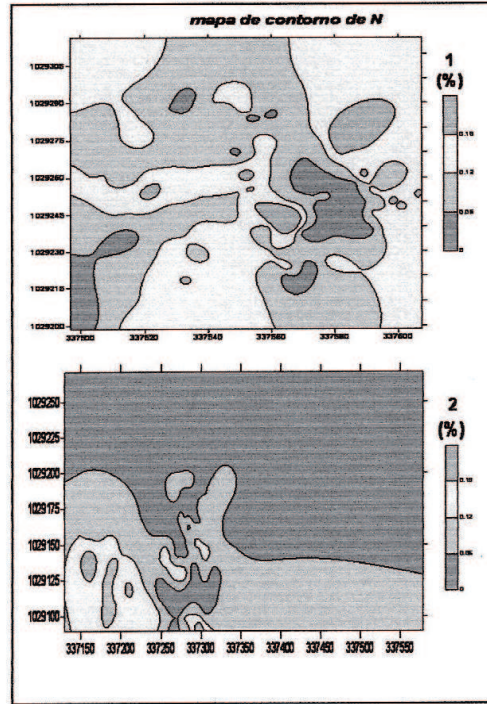


Figura 6. Mapa de contorno de la distribución del Nitrógeno (N)



7. Mapa de contorno la distribución de Fosforo (P)

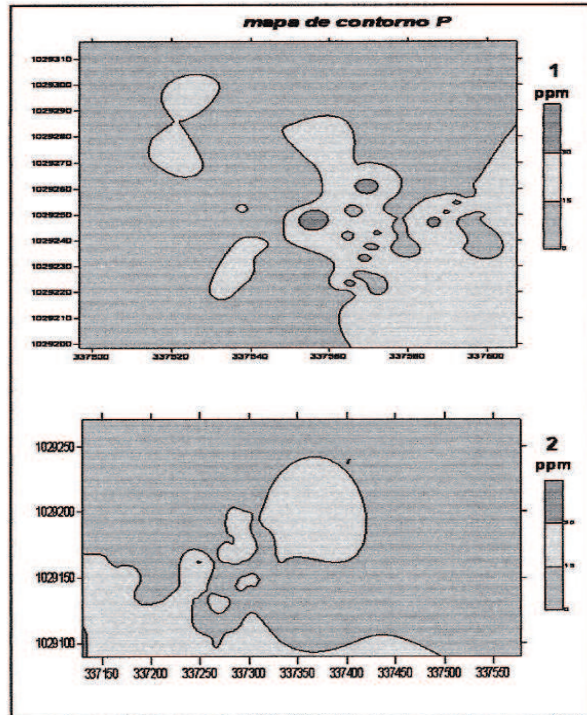


Figura 8. Mapa de contorno de la distribución de Potasio (K)

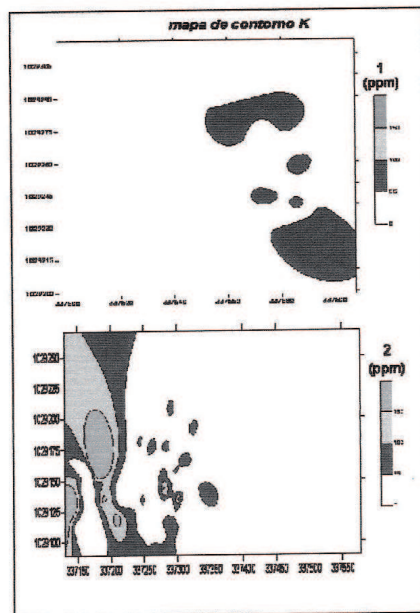


Figura 9. Mapa de contorno de la distribución de Calcio (Ca)

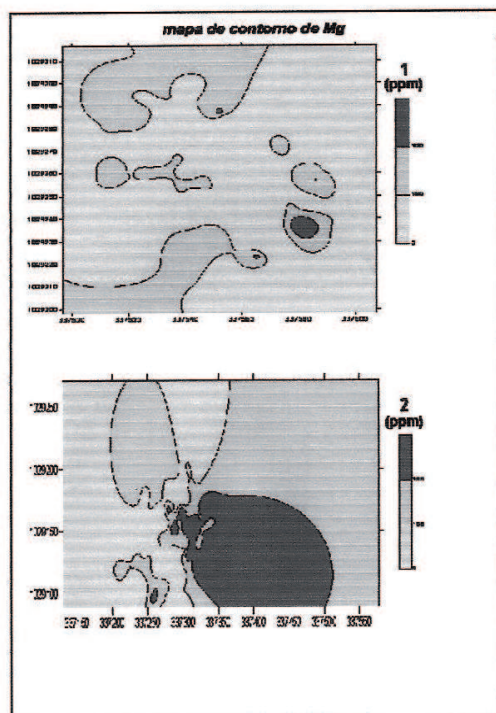


Figura 10. Mapa de contorno de la distribución de Magnesio (Mg)

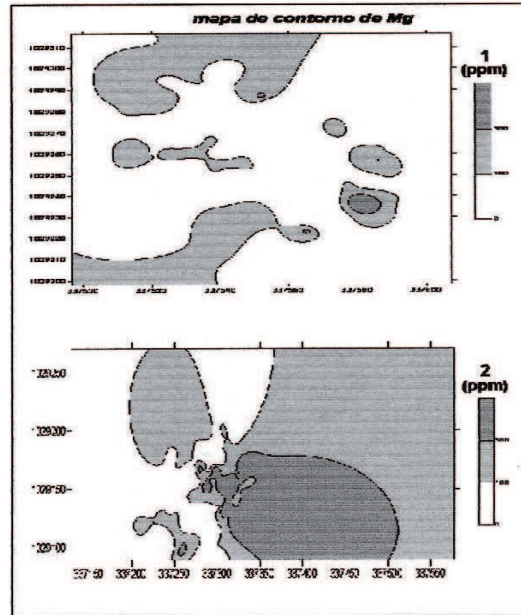


Figura 11
Semivariograma Omnidireccional para la variable MO

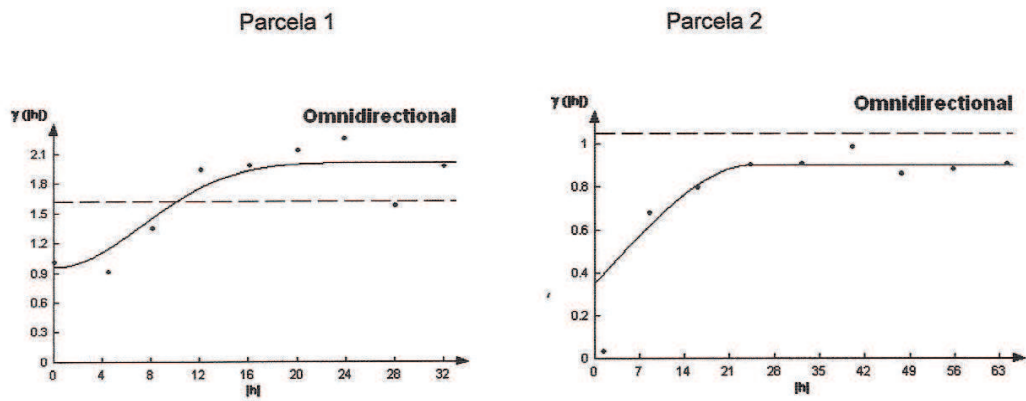


Figura 12
Semivariograma Omnidireccional para la variable Ca
Parcela 1 Parcela 2

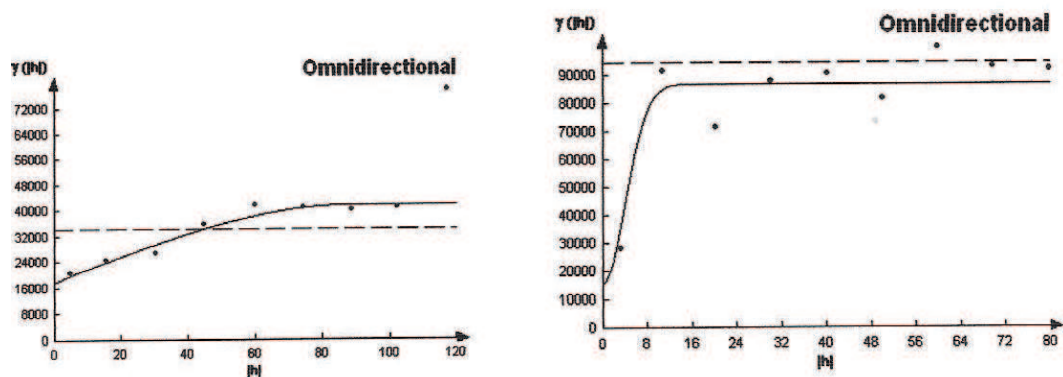


Figura 13
Semivariograma Omnidireccional para la variable P
Parcela 1 Parcela 2

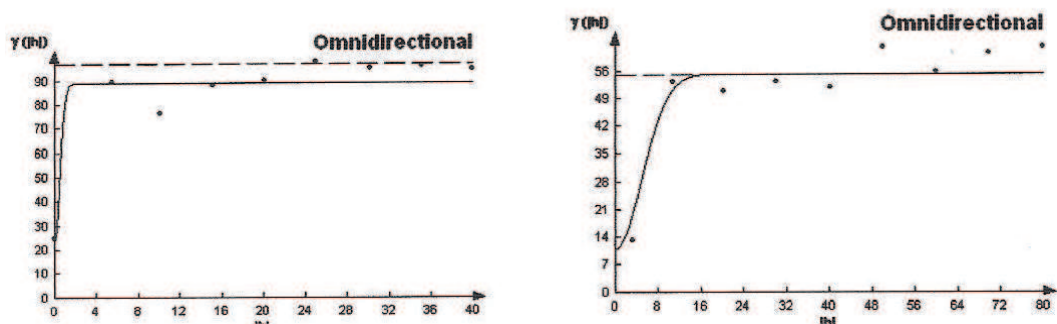


Figura 14
Semivariograma Omnidireccional para la variable CE

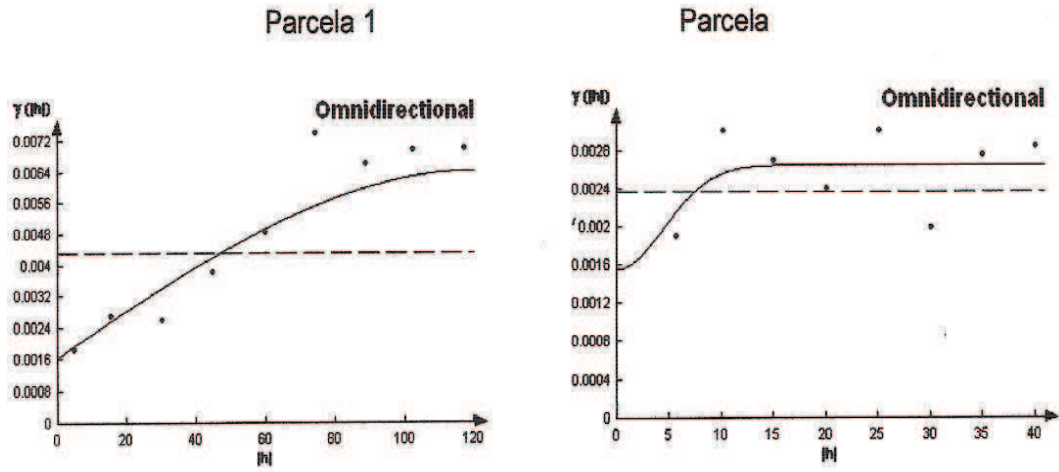


Figura 15
Semivariograma Omnidireccional para la variable pH
Parcela 1 Parcela 2

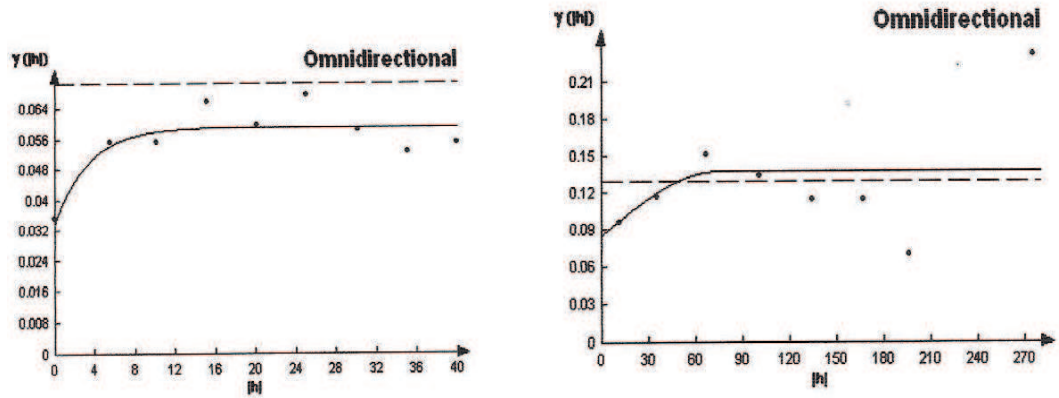


Figura 16
Semivariograma Omnidireccional para la variable P

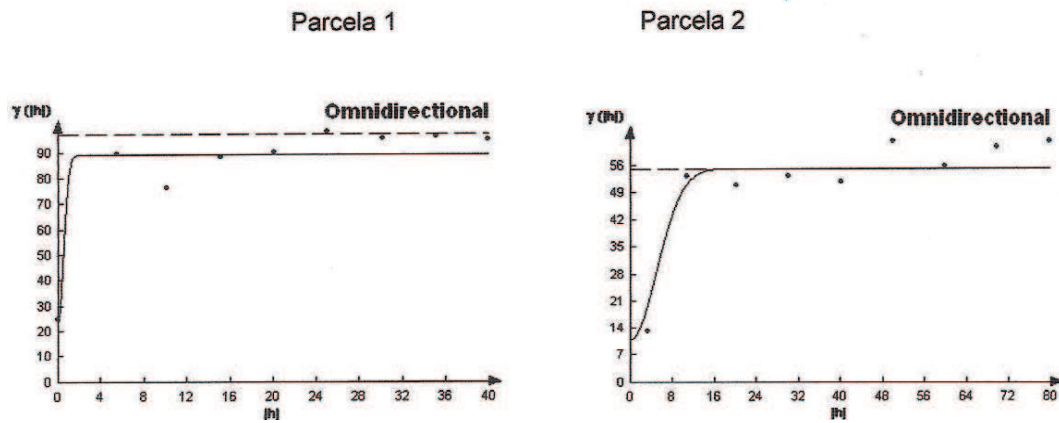


Figura 17
Semivariograma Omnidireccional para la variable Mg

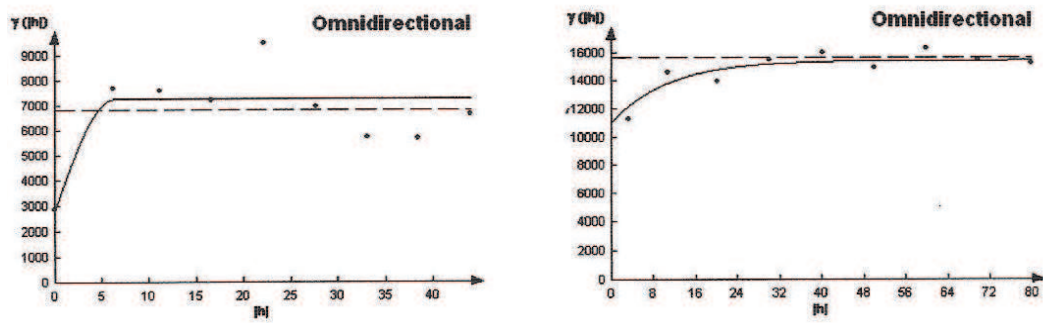


Figura 18
Semivariograma Omnidireccional para la variable K
 Parcela 1 Parcela 2

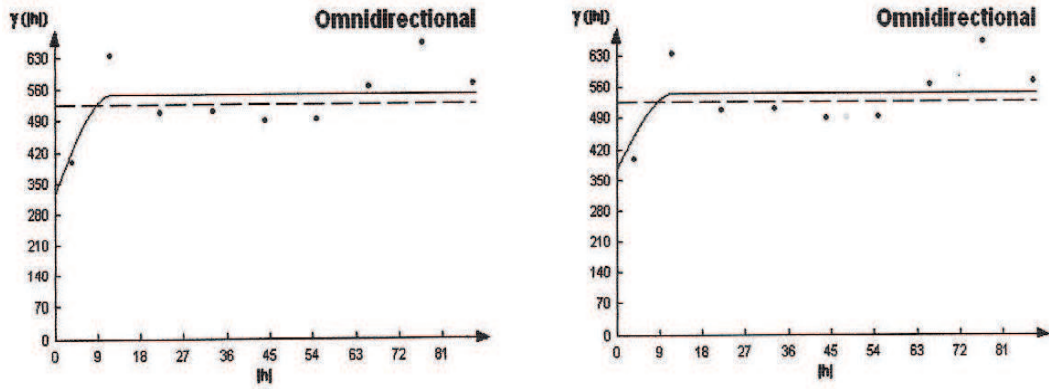


Figura 19
Semivariograma Omnidireccional para la variable AI
 Parcela 1 Parcela 2

