

# **UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA**

CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AGROPECUARIAS  
**DIVISIÓN DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
COORDINACIÓN DE POSGRADO



## **VARIABILIDAD ESPACIAL DE ALGUNAS PROPIEDADES DEL SUELO EN TERRENOS DE USO AGRÍCOLA**

**Patricia Zarazúa Villaseñor**

**TESIS**

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS AGRÍCOLAS Y FORESTALES**

Zapopan, Jalisco, Julio de 2005

# UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA

CENTRO UNIVERSITARIO DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AGROPECUARIAS  
DIVISIÓN DE CIENCIAS AGRONÓMICAS  
COORDINACIÓN DE POSGRADO



Esta tesis titulada **"Variabilidad espacial de algunas propiedades del suelo en terrenos de uso agrícola"**, fue realizada bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para la obtención de grado de:

## MAESTRÍA EN CIENCIAS AGRÍCOLAS Y FORESTALES

### CONSEJO PARTICULAR:

Tutor:

Dr. Diego Raymundo González Eguiarte

Asesor:

Dr. José Ariel Ruiz Corral

Asesor:

M.C. Ricardo Nuño Romero

Asesor:

Dr. Eduardo López Alcocer

Asesor:

M.C. José Pablo Torres Morán

Las Agujas, Mpio. Zapopan, Jal., Julio de 2005

*Dedicatorias:*

*A Dios,  
Por acompañarme en la vida,*

*A Adalberto,  
Por apoyarme con paciencia y amor en todas mis metas,*

*A Edith y Raquel,  
Que con su alegría son la luz de mi vida,*

*A mis padres Ma Elena y Bonifacio,  
Por su dedicación y ejemplo,*

*A mis hermanas y hermanos,  
Por su apoyo incondicional.*

## Agradecimientos:

A la Universidad de Guadalajara, por darme la oportunidad de formarme.

A mi Director y Asesores, Dr. Diego González Eguiarte, Dr. Ariel Ruiz Corral y M.C. Ricardo Nuño Romero, por su dedicación en la realización de este trabajo.

A Pablo Torres, por su gran amistad y apoyo en esta actividad.

A mis amigas del Laboratorio de Agrología del CUCBA, por su apoyo en el análisis de las muestras.

A mis amigas y amigos del posgrado, por motivarme a terminar este trabajo.

# Contenido

	Págs.
Resumen .....	<i>i</i>
Abstract .....	<i>ii</i>
1. Introducción .....	1
2. Objetivos, Hipótesis y Supuestos .....	4
2.1 Objetivos .....	4
2.2 Hipótesis .....	4
2.3 Supuestos .....	5
3. Revisión de Literatura .....	6
3.1 Evaluación de la fertilidad del suelo .....	6
3.1.1 Características asociadas con la fertilidad del suelo ....	6
3.1.1.1 Potencial Hidrógeno .....	6
3.1.1.2 Materia orgánica .....	7
3.1.1.3 Capacidad de intercambio catiónico .....	7
3.1.1.4 Tamaño de partículas del suelo .....	7
3.1.2 Índices de disponibilidad de nutrimentos .....	8
3.1.2.1 Fósforo aprovechable .....	8
3.2 Diagnóstico de la fertilidad del suelo .....	8
3.2.1 Tipos de muestreo de suelos .....	9
3.2.1.1 Muestreo irrestricto aleatorio .....	9
3.2.1.2 Muestreo aleatorio estratificado .....	10
3.2.1.3 Muestreo sistemático .....	10
3.2.1.4 Submuestreo .....	11
3.2.1.5 Muestra compuesta .....	11
3.2.1.6 Muestreo de juicio .....	12
3.2.1.7 Muestreo en parcelas agrícolas .....	12
3.2.2 Métodos analíticos para determinar las variables en estudio .....	13
3.2.2.1 pH del suelo .....	13
3.2.2.2 Materia orgánica .....	13
3.2.2.3 Capacidad de intercambio catiónico .....	13
3.2.2.4 Tamaño de partículas .....	14
3.2.2.5 Fósforo aprovechable .....	14
3.3 Evaluación de la variabilidad espacial .....	15

3.3.1 Técnicas descriptivas para evaluar la variabilidad espacial .....	16
3.3.2 Técnicas geoestadísticas .....	19
3.3.2.1 Cuantificación de la dependencia espacial .....	20
3.3.2.1.1 Correlograma .....	21
3.3.2.1.2 Semivariograma .....	24
3.3.2.2 Interpolación espacial .....	29
3.3.2.2.1 Kriging puntual .....	30
3.3.2.2.2 Kriging de bloques .....	30
3.3.2.2.3 Co-Kriging .....	32
4. Materiales y Métodos .....	34
4.1 Características de las parcelas de estudio .....	34
4.1.1 Parcela Atequiza .....	34
4.1.1.1 Localización .....	34
4.1.1.2 Clima .....	34
4.1.1.3 Suelo .....	35
4.1.1.4 Manejo agrícola .....	35
4.1.2 Parcela Villa Corona .....	35
4.1.2.1 Localización .....	35
4.1.2.2 Clima .....	35
4.1.2.3 Suelo .....	35
4.1.2.4 Manejo agrícola .....	36
4.1.3 Parcela Zapopan .....	36
4.1.3.1 Localización .....	36
4.1.3.2 Clima .....	36
4.1.3.3 Suelo .....	37
4.1.3.4 Manejo agrícola .....	37
4.2 Actividades para toma de muestras en el campo .....	37
4.2.1 Materiales .....	37
4.2.2 Metodología del muestreo .....	38
4.2.2.1 Muestreo preliminar .....	38
4.2.2.2 Muestreo sistemático .....	38
4.3 Actividades desarrolladas en el laboratorio .....	39
4.3.1 Material y equipo utilizado .....	41
4.3.2 Metodología en laboratorio .....	42

4.3.2.1 Preparación de las muestras .....	42
4.3.2.2 Técnicas analíticas .....	42
4.4. Proceso de la información .....	43
4.4.1 Equipo utilizado .....	43
4.4.2 Captura y validación de los datos .....	43
4.4.2.2 Análisis de correlación .....	43
4.4.2.3 Dependencia espacial .....	44
4.4.2.4 Interpolación .....	44
5. Resultados y Discusión .....	45
5.1 Análisis de estadística descriptiva .....	45
5.2 Análisis de correlación .....	49
5.3 Análisis de dependencia espacial .....	50
5.3.1 Prueba de validación cruzada .....	53
5.4 Interpolación .....	55
5.5 Selección de modelos y variables .....	59
5.6 Formación de estratos con los resultados de la interpolación y los valores observados .....	63
6. Conclusiones .....	71
7. Apéndice .....	72
7.1 Anexo 1. Gráficas de caja y bigotes por variable de estudio .....	72
7.2 Anexo 2. Gráficas de localización de los valores observados para cada variable y su clasificación según criterios agronómicos.....	74
7.3 Anexo 3. Semivariogramas resultantes en el análisis de dependencia espacial para cada variable estudiada .....	77
7.4 Anexo 4. Gráficas resultantes de la prueba de validación cruzada para las variables seleccionadas según modelo de mejor ajuste en los semivariogramas .....	86
8. Bibliografía .....	92

## Índice de Cuadros

	Págs.
Cuadro 1 Rangos en valores para el coeficiente de variación de algunas propiedades del suelo .....	19
Cuadro 2 Variación en el parámetro Rango para los modelos de semivariogramas de propiedades del suelo seleccionadas .....	25
Cuadro 3 Técnicas analíticas utilizadas en la determinación de los parámetros del suelo a estudiar .....	42
Cuadro 4 Estadística descriptiva de las 98 muestras de la parcela Atequiza .....	45
Cuadro 5 Estadística descriptiva de las 50 muestras de la parcela Villa Corona .....	46
Cuadro 6 Estadística descriptiva de las 78 muestras de la parcela Zapopan .....	47
Cuadro 7 Resultados de la prueba de Normalidad para las variables estudiadas .....	48
Cuadro 8 Matriz de Correlación de las variables de estudio en la parcela Atequiza .....	49
Cuadro 9 Matriz de Correlación de las variables de estudio en la parcela Villa Corona .....	49
Cuadro 10 Matriz de Correlación de las variables de estudio en la parcela Zapopan .....	50
Cuadro 11 Parámetros del Semivariograma para las variables de estudio de la parcela Atequiza .....	51
Cuadro 12 Parámetros del semivariograma para las variables de estudio de la parcela Villa Corona .....	52
Cuadro 13 Parámetros del Semivariograma para las variables de estudio de la parcela Zapopan .....	53
Cuadro 14 Resultados de la prueba de validación cruzada para las variables estudiadas .....	54
Cuadro 15 Categorización de las variables de estudio de acuerdo a la magnitud del Coeficiente de Variación .....	58

## Índice de figuras

		Págs.
Figura 1	Localización de la parcela Atequiza .....	34
Figura 2	Localización de la parcela Villa Corona .....	36
Figura 3	Localización de la parcela Zapopan .....	37
Figura 4	Toma de submuestras aleatorias en la cuadrícula trazada en el terreno .....	39
Figura 5	Localización de los puntos muestreados en la cuadrícula de dimensiones 20x20 m en la parcela Atequiza .....	40
Figura 6	Localización de los puntos muestreados en la cuadrícula de dimensiones 20x20m en la parcela Villa Corona .....	40
Figura 7	Localización de los puntos muestreados en la cuadrícula de dimensiones 20x20 m en la parcela Zapopan .....	41
Figura 8	Mapa de interpolación por kriging de bloques para la variable porcentaje de materia orgánica en la parcela Atequiza .....	66
Figura 9	Mapa de interpolación por kriging de bloques para la variable capacidad de intercambio catiónico en meq/100 g de suelo en la parcela Atequiza .....	67
Figura 10	Mapa de interpolación por kriging de bloques para la variable P-Bray en la parcela Villa Corona .....	68
Figura 11	Mapa de interpolación por kriging de bloques para la variable pH en la parcela Zapopan .....	69
Figura 12	Mapa de interpolación por kriging de bloques para la variable porcentaje de arcilla en la parcela Zapopan .....	70
Figura A1	Gráfica de caja y bigotes del pH por parcela .....	72
Figura A2	Gráfica de caja y bigotes del porcentaje de materia orgánica por parcela .....	72
Figura A3	Gráfica de caja y bigotes de la capacidad de intercambio catiónico en meq/100 g por parcela .....	73
Figura A4	Gráfica de caja y bigotes del P-Bray por parcela .....	73
Figura A5	Gráfica de caja y bigotes del porcentaje de arcilla por parcela .....	74
Figura A6	Localización y clasificación de los valores de porcentaje de materia orgánica en la parcela Atequiza .....	75
Figura A7	Localización y clasificación de los valores de capacidad de intercambio catiónico en la parcela Atequiza .....	75
Figura A8	Localización y clasificación de los valores de P-Bray en la parcela Villa Corona .....	76
Figura A9	Localización y clasificación de los valores de pH en la parcela Zapopan .....	76
Figura A10	Localización y clasificación de los valores de porcentaje de arcilla en la parcela Zapopan .....	77
Figura A11	Semivariograma isotrópico del pH en la parcela Atequiza .....	78
Figura A12	Semivariograma isotrópico del porcentaje de materia orgánica en la parcela Atequiza .....	78
Figura A13	Semivariograma isotrópico de la capacidad de intercambio catiónico en la parcela Atequiza .....	79

Figura A14	Semivariograma isotrópico del P-Bray en la parcela Atequiza..	79
Figura A15	Semivariograma isotrópico del porcentaje de arcilla en la parcela Atequiza .....	80
Figura A16	Semivariograma Isotrópico del pH en la parcela Villa Corona..	80
Figura A17	Semivariograma isotrópico del porcentaje de materia orgánica en la parcela Villa Corona .....	81
Figura A18	Semivariograma isotrópico de la capacidad de intercambio catiónico en la parcela Villa Corona .....	81
Figura A19	Semivariograma isotrópico del P-Bray en la parcela Villa Corona .....	82
Figura A20	Semivariograma isotrópico del porcentaje de arcilla en la parcela Villa Corona .....	82
Figura A21	Semivariograma isotrópico del pH en la parcela Zapopan .....	83
Figura A22	Semivariograma isotrópico del porcentaje de materia orgánica en la parcela Zapopan .....	83
Figura A23	Semivariograma isotrópico de la capacidad de intercambio catiónico en la parcela Zapopan .....	84
Figura A24	Semivariograma isotrópico del P-Bray en la parcela Zapopan..	84
Figura A25	Semivariograma isotrópico del porcentaje de arcilla en la parcela Zapopan .....	85
Figura A26	Prueba de validación cruzada para el pH en la parcela Atequiza .....	86
Figura A27	Prueba de validación cruzada para el porcentaje de materia orgánica en la parcela Atequiza .....	86
Figura A28	Prueba de validación cruzada para la capacidad de intercambio catiónico en la parcela Atequiza .....	87
Figura A29	Prueba de validación cruzada para el porcentaje de arcilla en la parcela Atequiza .....	87
Figura A30	Prueba de validación cruzada para P-Bray en la parcela Villa Corona .....	88
Figura A31	Prueba de validación cruzada para el porcentaje de arcilla en la parcela Villa Corona .....	88
Figura A32	Prueba de validación cruzada para el pH en la parcela Zapopan .....	89
Figura A33	Prueba de validación cruzada para el porcentaje de materia orgánica en la parcela Zapopan .....	89
Figura A34	Prueba de validación cruzada de la capacidad de intercambio catiónico en la parcela Zapopan .....	90
Figura A35	Prueba de validación cruzada para P-Bray en la parcela Zapopan .....	90
Figura A36	Prueba de validación cruzada para el porcentaje de Arcilla en la parcela Zapopan. ....	91

## RESUMEN

El manejo de la fertilidad de un suelo agrícola se basa en el análisis de una muestra representativa de la parcela. El muestreo tradicional, que consiste en la obtención de una muestra compuesta, es la técnica más comúnmente utilizada. Las técnicas de muestreo intensivo junto con la geoestadística, han probado detectar con un alto grado de confianza la variabilidad que se puede presentar en el suelo. El objetivo general del presente trabajo fue evaluar mediante técnicas geoestadísticas, la variabilidad espacial de algunas propiedades del suelo inherentes a la fertilidad, en tres parcelas agrícolas que se considerarían como homogéneas en un muestreo tradicional. Se seleccionaron tres parcelas de uso agrícola homogéneo de los tipos de suelo *Vertisol pélico*, *Phaeozem háplico* y *Regosol éutrico*, en las parcelas denominadas Atequiza, Villa Corona y Zapopan, respectivamente. Se realizó un muestreo intensivo mediante cuadrícula de dimensiones 20x20m, analizándose estas muestras mediante las técnicas analíticas recomendadas por la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo y determinando las características: pH, porcentaje de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, P-Bray y porcentaje de arcilla. Para los datos obtenidos se desarrolló estadística descriptiva, semivariogramas y su ajuste a modelos teóricos, prueba de validación cruzada e interpolación mediante kriging. Por último se elaboraron los mapas para cada parcela en las variables que resultaron con buen ajuste a los modelos. Los coeficientes de variación más bajos resultaron para el pH (2.71, 11.37 y 11.50%), y los más altos para el P-Bray (32.22, 35.50 y 37.38%). Los modelos teóricos de semivariogramas que mejor se ajustaron fueron el esférico, el exponencial y el gaussiano, cuyos rangos de dependencia espacial variaron desde 42m hasta 601m. Las variables analizadas presentaron isotropía en las parcelas estudiadas. Los mapas de interpolación para las variables: porcentaje de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico en la parcela Atequiza; P-Bray en la parcela Villa Corona; así como, pH y porcentaje de arcilla en la parcela Zapopan, muestran zonas estratificadas en 2 a 5 niveles de categorización según el criterio agronómico. Dichos mapas son congruentes con los mapas de puntos observados para las variables, con excepción del mapa para la variable porcentaje de materia orgánica en la parcela Atequiza, en el cual los valores medidos presentan desviaciones respecto a los estimados.

## ABSTRACT

The fertility management in agriculture soils is based in the test of a representative sample of the plot. The traditional sampling soil which consist in a composite sample, is the most frequently technique used. The techniques of intensive sampling and geostatistics, had proved detect with a high confiability, the variability we can find in the soil. The main objetive of t he present investigation was to evaluate by geostatistics techniques, the spatial variability of some soil characteristics of fertility, in three plots consider as homogeneous in the traditional sampling. We choose three plots of agriculture management, which were *Vertisol pelic*, *Phaeozem haplic* and *Regosol eutric*, with the names of Atequiza, Villa Corona and Zapopan. We made an intensive sampling by a grid of 20x20m, then the samples were analized by the techniques of the "Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo" for soil pH, organic matter, cationic exchangeable capacity, P.Bray and clay percent. The data was analized by descriptive statistics, semivariograms and it was fit to the theoretical models, cross validation and interpolation by kriging. Finally we put the results in maps for each plot, with the variable which results with a better model fitted. The lowest variation coeficients were for the pH (2.71, 11.37 and 11.50%), and the highest for the P-Bray (32.22, 35.50 and 37.38). The theoretical models for semivariograms that better fitted were spherical, exponential and gaussian, with ranges of spatial dependency from 42m to 601m. The tested variable showed isotropy in the studied plots. The interpolated maps were: organic matter and cationic exchangeable capacity in the plot of Atequiza, P-Bray in the plot of Villa Corona, and pH and clay in the plot of Zapopan, they showed stratified zones in 2 to 5 levels according to the agronomic criteria. Those maps agreed with the maps of points with actual values, except the map of organic matter in the plot of Atequiza, in which mesure values showed deviations to the estimated values.

## 1. INTRODUCCIÓN

El estudio del suelo avanza de acuerdo a las necesidades del productor agrícola y mediante el uso de nuevas tecnologías cada vez más modernas. Así mismo, se buscan sistemas agrícolas sustentables, tanto para el entorno natural, como para la economía del productor. El diagnóstico del suelo es una herramienta básica para el adecuado manejo de la fertilidad de los suelos, tal como lo mencionan Volke *et al.* (1998), al considerar que para el enfoque de agrohábitats, así como para el de balance nutrimental para la recomendación de fertilización, es indispensable el análisis de suelo para lograr una mayor precisión.

Es común encontrar que el productor agrícola de Jalisco se interese por el estado de fertilidad de su suelo; así lo refleja la gran cantidad de solicitudes de análisis de suelos reportados por los laboratorios agrológicos, como es el caso del Laboratorio de Agrológica del Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, que en los últimos años ha incrementado el número de muestras analizadas en 700 por año en promedio. Esto ha permitido que los rendimientos agrícolas se incrementen, pero también se ha incrementado el uso de fertilizantes químicos, la contaminación de suelos y aguas, y la degradación de algunos suelos en casos extremos.

El uso inadecuado de estos insumos agrícolas ha propiciado la contaminación de extensas áreas, modificando ecosistemas y deteriorando la salud humana y animal. Al respecto Mckone y Maddalena (1997), indican que de los factores contaminantes al suelo y agua, los correspondientes a pesticidas y fertilizantes agrícolas son más fácilmente medibles y pueden ser controlados. Singer y Ewing (2000), mencionan que en el manejo agrícola es indispensable buscar un incremento de la calidad del suelo, lo que permitirá el manejo sustentable del mismo. Jiao *et al.* (2004), consignan que el uso de fosfato monoamónico y superfosfato de calcio triple, grado comercial, incrementaron la concentración de Cadmio en semillas de lino, pero que la aplicación

de zinc, disminuye la asimilación del cadmio y por tanto su concentración en el grano.

Buscando disminuir estos problemas, en algunas regiones se utiliza el sistema de Agricultura de Precisión, por ser la forma idónea de manejo de la fertilidad al incorporar al suelo sólo las cantidades necesarias de fertilizantes para obtener un buen rendimiento. Aunque esta técnica es efectiva, la falta de maquinaria e implementos para aplicarla por la mayoría de los productores, no permite que se realice en forma generalizada.

Esto favorece que se sigan utilizando los sistemas tradicionales de recomendación de fertilización, en los cuales el suelo se estudia mediante una muestra compuesta. Sin embargo, la representatividad de las muestras de suelo ha sido discutida por varios investigadores (Rodríguez y Burguete, 1987; Paz *et al.* 1996; entre otros), quienes reconocen la importancia de la variabilidad espacial de las propiedades del suelo, no sólo en grandes superficies, sino también a nivel de parcela. Por lo que esta variabilidad espacial debe ser tomada en cuenta en estudios en los que se busque la precisión requerida por los sistemas modernos de explotación.

Lo anterior hace pensar que una muestra compuesta obtenida en una superficie "aparentemente homogénea", genera una recomendación de un manejo homogéneo para toda la parcela. Pero la muestra compuesta puede no ser representativa y no tendremos la posibilidad de detectar la variabilidad espacial de algunas propiedades del suelo, por lo que la recomendación al ser general, no tiene los mismos resultados en toda la parcela.

El uso de técnicas geoestadísticas, permite evaluar la variabilidad y encontrar patrones de distribución espacial que orienten a los investigadores en la definición

de: métodos de muestreo, generación de recomendaciones y prácticas de manejo más adecuadas, para lograr el uso sustentable del suelo en regiones agrícolas.

Aunque por su origen, las técnicas geoestadísticas no fueron diseñadas propiamente para el estudio del suelo desde el punto de vista de la fertilidad, son útiles para comprender el comportamiento de las variables del suelo y sus interrelaciones en un espacio determinado, al respecto se ha hecho uso de estas técnicas en los trabajos de Warrick *et al.* (1986), y en México en los trabajos de Cristóbal *et al.* (1996).

## 2. OBJETIVOS, HIPÓTESIS Y SUPUESTOS.

### 2.1. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo fue evaluar mediante técnicas geoestadísticas, la variabilidad espacial de algunas propiedades del suelo inherentes a la fertilidad, en tres parcelas agrícolas consideradas aparentemente homogéneas.

Los objetivos específicos fueron:

Formar un banco de muestras de suelo de cada parcela en estudio.

Realizar un análisis de estadística descriptiva para cada variable de estudio: pH, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, fósforo aprovechable y porcentaje de arcilla.

Generar el mejor modelo que describa la dependencia espacial para cada variable estudiada.

Elaborar mapas de interpolación para aquellas variables que resulten con estructura espacial bien definida.

### 2.2. Hipótesis.

En el muestreo tradicional en una parcela agrícola se asume una homogeneidad razonable y no involucra la variabilidad espacial. Con la aplicación de un muestreo sistemático y técnicas geoestadísticas en el mismo sitio, es posible detectar variabilidad espacial y su orientación, lo que permite derivar interpretaciones más precisas, la interpolación de valores y la representación cartográfica de las variables.

### 2.3. Supuestos.

La variabilidad espacial de las propiedades edáficas incluidas en este estudio en las tres parcelas, es del tipo isotrópico, debido a que la selección de las mismas se basó en el criterio tradicional de muestreo y en el manejo que han recibido como “parcelas razonablemente homogéneas” y considerando que el área que abarcan por cada una de ellas no tiene variaciones importantes en lo que se refiere a geología, topografía y condiciones climáticas, según lo investigado en la literatura.

### 3. REVISION DE LITERATURA

#### 3.1 Evaluación de la fertilidad del suelo.

La necesidad de incrementar constantemente la producción de alimentos, exige conocer tanto el estado nutricional del suelo, como de las necesidades propias de los cultivos, para de esta manera diseñar un manejo adecuado de nutrimentos que asegure buenas cosechas y de buena calidad. Las técnicas de diagnóstico incluyen tanto el estudio nutricional de las plantas, como el estudio nutricional del suelo. Etchevers (1999), consigna que existen dos tipos de análisis del suelo, el que mide una característica asociada con la fertilidad del suelo y el que mide un índice de disponibilidad de un nutrimento en el suelo.

3.1.1 Características asociadas con la fertilidad del suelo. Son aquellas propiedades del suelo asociadas con su fertilidad. La interpretación de estos análisis es directa, es decir, se dispone de tablas que tienen una validez casi universal (Etchevers, 1999).

3.1.1.1 Potencial Hidrógeno. Brady y Weil (1996) y Havlin *et al.* (1999), mencionan que el pH representa la concentración de iones  $H^+$  y no una medida de la disociación del  $H^+$  ó acidez potencial y que se ve afectado por el contenido de materia orgánica, minerales de origen, mejoradores del suelo y fertilizantes aplicados al mismo. El pH es un factor importante en la determinación de la vegetación dominante en el paisaje, en el crecimiento de los cultivos y es el principal controlador de la disponibilidad de nutrimentos y reacciones microbianas en el suelo. Así mismo, estos autores explican que el pH tiene efectos en el desarrollo de microorganismos relacionados con la disponibilidad de nutrimentos como es el caso del nitrógeno, liberación de elementos que interfieren con la disponibilidad de nutrimentos como fósforo y potasio, ó bien, provocando una mayor retención de elementos cuando aumenta la concentración de  $H^+$ , como es el caso del calcio y magnesio. En cuanto a las sustancias que actúan como amortiguadores del pH en el suelo, Bloom (2000), expresa que para el rango

de pH entre 5 y 8, el  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , la materia orgánica y el Al interlaminar de arcillas tipo 2:1, son las principales formas amortiguadoras.

3.1.1.2 Materia orgánica. Brady y Weil (1996), consignan que la materia orgánica es una mezcla compleja y variada de sustancias orgánicas, las cuáles influyen en el intercambio de cationes, estabilidad de agregados, retención de humedad en el suelo y aportación de diversos nutrimentos. Así mismo participa en la formación de quelatos de iones metálicos como el fierro, el zinc, y otros. Baldock y Nelson (2000), por su parte mencionan que estos efectos en las propiedades de los suelos, pueden no ser únicamente consecuencia de variaciones cualitativas y cuantitativas de los componentes orgánicos del suelo.

3.1.1.3 Capacidad de intercambio catiónico. Es la suma total de cationes intercambiables que un suelo puede adsorber, medida en  $\text{cmol}_c/\text{kg}$  de suelo. Havlin *et al.* (1999), consideran que el uso de  $\text{meq}/100$  g de suelo, para medir esta propiedad es muy conveniente debido a la naturaleza de las reacciones de intercambio ocurridas en el suelo. Por su parte Sposito (2000), indica que la capacidad de intercambio iónico de un suelo es el número de moles de carga de ión adsorbido que puede ser liberado de la unidad de masa del suelo bajo condiciones específicas de temperatura, presión, composición de la solución del suelo y radio de masa de la solución del suelo. De acuerdo a la carga y al tamaño del catión hidratado, las fuerzas de retención ocurridas en el intercambio se presentan en una serie liotrópica:  $\text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ = \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+$ . Otero *et al.* (1998), consignan correlaciones altamente significativas entre la CIC, el porcentaje de materia orgánica y el porcentaje de arcilla en los suelos de tres regiones de la Provincia de Granma en Cuba, con valores de  $r^2$  de 0.94, 0.46 y 0.65 respectivamente.

3.1.1.4 Tamaño de partículas del suelo. La principal razón del estudio de esta propiedad, son las relaciones entre el tamaño de partículas y su área superficial, ya que esta última tiene influencia en los procesos que ocurren en la superficie de las

partículas del suelo tales como retención de humedad, adsorción de nutrientes, cargas electromagnéticas tanto positivas como negativas, etc. (Brady y Weil, 1996).

3.1.2 Índices de disponibilidad de nutrientes. Etchevers, (1999), manifiesta que estos índices de disponibilidad pueden ser la fracción soluble, intercambiable, extraíble, fijada o mineralizable, aunque ninguna de las cantidades medidas por estos métodos es la que realmente la planta puede utilizar, sino que son cantidades relacionadas con la parte disponible en el suelo y que la planta puede aprovechar.

3.1.2.1 Fósforo aprovechable. El fósforo tiene las siguientes funciones en la planta: forma parte de las nucleoproteínas, se encuentra en las enzimas que catalizan reacciones metabólicas, forma parte del ADN y el ATP; así mismo forma parte de los fosfolípidos, de la fitina y funciona también como regulador de la floración. Curti-Díaz *et al.* (1997), utilizaron un compuesto de fósforo para acelerar la floración y el rendimiento en el cultivo del naranjo, por otro lado, Castellanos *et al.* (2000), manifiestan que el crecimiento de las raíces, particularmente las raíces laterales, se ve favorecido por la nutrición del fósforo. Así lo confirman Pellerin *et al.* (2000), quienes informan que en condiciones deficientes de fósforo, se redujo el número de raíces adventicias para los fitómeros 4 al 7, en plantas de maíz. Yadvinder *et al.* (2000), reportan como resultado de la deficiencia de fósforo, una disminución en el rendimiento del grano en trigo y arroz. Salgado *et al.* (2000), expresan que una aportación adecuada fósforo+potasio resulta en una ganancia significativa en el rendimiento de caña de azúcar. Logan (2000), consigna que el principal impacto ambiental del exceso de fósforo en el suelo es la eutrofización en lagos y arroyos debido a escurrimientos y erosión.

### 3.2 Diagnóstico de la fertilidad del suelo.

En la práctica agrícola, el muestreo de suelos es un paso importante para el diagnóstico de la fertilidad de los suelos, lo que contribuye a obtener rendimientos

satisfactorios. Ya que el propósito del muestreo, según Petersen y Calvin (1986), es estimar ciertos parámetros de una población, con un nivel de seguridad de acuerdo a las necesidades y con el menor costo posible, y debido a la imposibilidad de estudiar en detalle grandes extensiones de suelo. Rodríguez y Burguete (1987), consignan que es preciso recurrir a la obtención de muestras para su observación. Uno de los aspectos más críticos de un análisis de suelos es la obtención de una muestra que será representativa de la parcela, puesto que los errores que aquí se cometan repercuten en los resultados de todas las determinaciones (Havlin *et al.*, 1999). Por otro lado, Castellanos *et al.* (2000), indican que el principio básico de un programa de diagnóstico del suelo, es que al terreno se le pueda hacer un muestreo en forma tal que el análisis químico de las muestras recolectadas reflejen con precisión el estado de fertilidad del mismo.

### 3.2.1 Tipos de muestreo del suelo.

Petersen y Calvin (1986), indican que un plan de muestreo designa cuáles unidades de la población serán incluidas en la muestra, y que existe un gran número de diseños ó planes de muestreo. Algunos de ellos son más precisos cuando requieren determinaciones de alta precisión, en tanto que otros pueden alcanzar sus objetivos con menor número de muestras y un mucho menor costo. Rodríguez y Burguete (1987), mencionan como métodos de muestreo del suelo al Muestreo Aleatorio Irrestricto; Muestreo Estratificado; Muestreo Polietápico ó Submuestreo; Muestreo Sistemático en una dimensión; Muestreo Sistemático en dos dimensiones y Alineado (Rejilla); y Muestreo Sistemático en dos dimensiones y semialineado.

3.2.1.1 Muestreo Irrestricto Aleatorio (según Petersen y Calvin, 1986). Una muestra aleatoria se define como aquella obtenida de tal manera que cada posible combinación de  $n$  unidades tiene la misma oportunidad de ser seleccionada. Si las unidades son enlistadas, el muestreo aleatorio puede realizarse fácilmente mediante el uso de Tablas de números aleatorios. Sin embargo, es más conveniente marcar localizaciones en el terreno seleccionando distancias aleatorias en un sistema de

coordinadas y utilizando la intersección de las dos distancias aleatorias como el punto en el cual la unidad será tomada.

3.2.1.2 Muestreo Aleatorio Estratificado (según Petersen y Calvin, 1986). Con el muestreo aleatorio estratificado, la población se divide en un número de subpoblaciones las cuales deben ser homogéneas dentro de ellas pero diferentes entre una subpoblación y otra. En cada subpoblación se toma una muestra aleatoria simple y el promedio se pondera con base en el tamaño de las subpoblaciones.

3.2.1.3 Muestreo Sistemático (según Petersen y Calvin, 1986). Este método abarca el muestreo en el cual las unidades seleccionadas se encuentran a distancias regulares unas de otras, ya sea en una ó en dos dimensiones. Uno de los principales problemas con el muestreo sistemático, es la estimación del error del muestreo por sí mismo. Para evitar esto, se han sugerido varios métodos, pero los más utilizados en la práctica son:

- a) Suponer que la población estuvo en orden aleatorio antes de que el muestreo sistemático se realizara y estimar el error de muestreo tal como un muestreo aleatorio simple.
- b) Bloquear o estratificar la muestra, suponiendo que la variación a través de un estrato o bloque, es solo variación de muestreo, y estimar el error de muestreo tal como un muestreo aleatorio estratificado; y
- c) Tomar un número de muestras sistemáticas separadas de manera aleatoria de todas las muestras sistemáticas posibles del mismo tipo, por ejemplo, cada muestra sistemática se realiza a partir de un punto seleccionado de manera aleatoria.

Con este método de muestreo del suelo se han realizado varias investigaciones con el objetivo principal de evaluar la variabilidad espacial de ciertas propiedades del suelo (Wollenhaupt y Wolkowski, 1994; Bullock *et al.* 1994; Smith y Rains, 1996; Melchiori *et al.* 2000 y Chevallier *et al.* 2000). Los estudios de geoestadística hacen uso de esta técnica de muestreo asociando los valores encontrados a su acomodo espacial en la parcela, de esta forma se pueden detectar gradientes geográficamente orientados además de bloques o zonas diferentes dentro de la parcela.

3.2.1.4 Submuestreo. En varios tipos de investigación de suelos, el uso del submuestreo ó muestreo polietápico, es ventajoso. Con esta técnica la unidad de muestreo es seleccionada por alguno de los métodos anteriores, pero dividida en un número de pequeños elementos que serán tomados aleatoriamente de la unidad, esto permite la estimación de algunas características de unidades de muestreo grandes, sin la necesidad de medir la unidad entera. (Petersen y Calvin, 1986). Young *et al.* (1998), estudiaron tres métodos de muestreo de suelos para estimar varianzas en 12 propiedades del suelo; estos métodos son: el muestreo simple aleatorio, el muestreo en conglomerado y el muestreo aleatorio bietápico. Concluyen que el muestreo aleatorio estimó las menores varianzas, aunque lo consideran cuestionable; el muestreo bietápico, conceptualmente, es el más correcto, pero requiere suposiciones dudosas acerca del tamaño de la población.

3.2.1.5 Muestra compuesta. En varias investigaciones del suelo, un ahorro substancial en el costo total puede resultar si los análisis de laboratorio son realizados en una muestra compuesta del terreno más que en muestras individuales (Petersen y Calvin, 1986; Rodríguez y Burguete, 1987). El procedimiento consiste en tomar muestras del terreno que representen adecuadamente la población en cuestión, mezclando a fondo estas muestras para formar una muestra compuesta que se llevará al laboratorio para el análisis. La suposición es que una estimación válida de la media de algunas características de la población se puede obtener por el análisis de la muestra compuesta. Esta suposición es válida sólo bajo ciertas

condiciones: todas las muestras que forman la muestra compuesta deberán ser tomadas de la población en estudio, cada muestra deberá contribuir con la misma cantidad a la compuesta. Al respecto Rodríguez y Burguete (1987), mencionan como otras condiciones, además de las anteriores, que no se presenten interacciones entre los materiales en el proceso de mezclado, y que el único parámetro de interés objetivo es un estimador insesgado de la media poblacional. La confiabilidad con la cual la media de la población es estimada dependerá de la variabilidad a través de las unidades de muestreo en la población y del número de tales unidades incluidas en la muestra compuesta. Si se cuenta con un estimado de la variabilidad de las unidades, éste puede ser utilizado para determinar el número de unidades a incluir en la muestra compuesta para lograr una precisión determinada. Si no se cuenta con una estimación de la variabilidad, la muestra compuesta deberá ser evitada si es posible.

3.2.1.6 Muestreo de Juicio. Este método se lleva a cabo mediante la selección de los sitios, de acuerdo al juicio del investigador, que al no ser aleatorio permite un sesgo en las estimaciones de los parámetros del suelo (Petersen y Calvin, 1986; Rodríguez y Burguete, 1987).

3.2.1.7 Muestreo en parcelas agrícolas. Jackson (1958), refiere que para terrenos de uso agrícola la obtención de una muestra representativa de la unidad, está determinada por la superficie de la misma que va de 2 a 4 has, y que en el caso de unidades muy grandes es necesario zonificar la unidad en base a diferencias en relieve, drenaje, textura, etc. Esta técnica de muestreo es un caso del muestreo de juicio, se sigue utilizando hasta la fecha por los productores, haciendo uso de un muestreo compuesto y considerando las características de la unidad antes mencionadas.

### 3.2.2 Métodos analíticos para determinar las variables en estudio.

3.2.2.1 pH del suelo. Goijberg y Aguilar (1987) mencionan que entre las técnicas más utilizadas para determinar el pH de los suelos está el método Electrométrico utilizando para ello tanto agua destilada como soluciones salinas. Davies, citado por Goijberg y Aguilar (1987), establece una estrecha correlación entre valores de pH medidos en agua y valores medidos en solución de  $\text{CaCl}_2$  0.01M. Como ventajas de ésta última mencionan independencia en la relación suelo:solución, eliminar diferencias debidas a presencia de sales, medir acidez activa e intercambiable; además permite estabilidad en la lectura del pH y la lectura tomada es aproximada a las condiciones de campo. Bloom (2000), expresa que los valores de pH obtenidos en solución de  $\text{CaCl}_2$  son generalmente menores que los tomados en suelos con el método que utiliza agua.

3.2.2.2. Materia orgánica. León y Aguilar (1987), consideran que entre las técnicas para determinar la materia orgánica del suelo, la que determina el carbono orgánico fácilmente oxidable, es la que interesa en la fertilidad del suelo, ya que es la fracción orgánica más importante en los procesos biológicos. La técnica de Walkley y Black recupera del 70 al 84% del carbono orgánico total y además, por su simplicidad, es el método más ampliamente usado para estimar la materia orgánica del suelo.

3.2.2.3 Capacidad de intercambio catiónico. Castellanos *et al.* (2000), mencionan que la determinación de la CIC del suelo ha evolucionado desde que el concepto se desarrolló a fines del siglo XIX. Los procedimientos ortodoxos para la determinación de esta propiedad del suelo son largos y tediosos, por lo que en un laboratorio de servicio, éstas técnicas no son prácticas ni accesibles económicamente, por lo que para medir la CIC del suelo para suelos sin carga variable y libres de carbonatos se utiliza la técnica de Acetato de Amonio 1N ajustada a pH de 7. Una vez saturado el suelo con el catión  $\text{NH}_4^+$  se realiza una destilación que permite medir mediante

titulación la CIC del suelo. Las unidades que actualmente se utilizan son  $\text{cmol}/\text{kg}$  que equivalen a  $\text{meq}/100\text{g}$  de suelo.

3.2.2.4 Tamaño de partículas del suelo. Castellanos *et al.* (2000), indican que la determinación del tamaño de partículas del suelo ó textura, involucra un pretratamiento de la muestra para la remoción de materia orgánica, óxidos de hierro, carbonatos y sales solubles, como una primera etapa. Cuando la presencia de materia orgánica es menor a 3% y de sales, menor a  $2\text{dS}/\text{m}$  (equivalente a  $\text{milimhos}/\text{cm}$ ), en el extracto de saturación, no es necesario realizar el pretratamiento antes descrito. Como una segunda etapa, se lleva a cabo la dispersión de la muestra en una solución acuosa mediante la adición de una sal de sodio, con la finalidad de remover agentes cementantes, rehidratación de arcillas y separación física de partículas individuales del suelo y enseguida la dispersión mecánica, según lo descrito por Gee y Bauder (1986) y Skopp (2000). León-Arteta (2001), indica que el método de Bouyoucos-Day para la dispersión mecánica, es el que mejores perspectivas ofrece para los laboratorios de servicio de la República Mexicana, así como que el mejor dispersante es el hexametáfosfato de sodio.

3.2.2.5 Fósforo aprovechable. Olsen y Dean (1965), mencionan que la mayoría de las determinaciones del fósforo en el suelo tienen dos fases: la primera es la preparación de una solución que contenga el total ó una fracción del fósforo del suelo; la segunda es la determinación cuantitativa del fósforo en esta solución. Cajuste (1987), refiere como soluciones extractoras de fósforo aprovechable en los suelos, las soluciones diluidas de ácidos fuertes, concentraciones diluidas de ácidos fuertes adicionadas con ión acomplejante, concentraciones diluidas de ácidos débiles y soluciones amortiguadoras alcalinas. Para suelos ácidos es recomendable el método de Bray y Kurtz que utiliza una mezcla de  $\text{HCl}$  y  $\text{NH}_4\text{F}$ , para remover las formas de fósforo fácilmente soluble. La determinación cuantitativa del fósforo en la solución se lleva a cabo mediante técnicas de espectrofotometría.

### 3.3 Evaluación de la variabilidad espacial.

En el Glosario de Agricultura de Precisión (INTA, 2000), se define la variabilidad espacial del suelo como “Diferencias en las condiciones del lote, tales como tipos de suelos y niveles de nutrimentos, para una locación de un lote a otro”.

Warrick *et al.* (1986), consignan que las variaciones de las propiedades del suelo tienden a estar correlacionadas, tanto vertical como horizontalmente, de tal forma que dos muestras tomadas muy cercanamente son más parecidas entre sí, que dos muestras tomadas en lugares más separados. Mulla y McBratney (2000), mencionan que la variación en las propiedades del suelo no sólo puede ocurrir en grandes extensiones como efecto de condiciones climáticas y material de origen, sino también en áreas reducidas debido a cambios topográficos que afectan el transporte y almacenamiento del agua en el perfil del suelo. El uso de mapas de unidades de suelo pudiera ser un indicador real de dichas variaciones de no ser porque pueden existir factores que aumentan dicha variación. Debido a lo anterior es posible clasificar la variación del suelo en dos tipos: a) Existe variabilidad en las unidades de mapas de suelos debida a errores de mapeo y clasificación, ya que a gran escala se manejan unidades de suelo dominantes. b) Hay variación en las unidades de mapas de suelos debidas al efecto de actividades humanas de manejo del suelo, las cuales pueden alterar o disturbar las características naturales del suelo. Debido a estos factores de variación, no podemos confiar en los mapas de unidades de suelo para describir los patrones de variación de las propiedades del mismo.

Por otro lado, la determinación de la variabilidad espacial y el uso de mapas de variabilidad, permiten un manejo específico del terreno tal como lo mencionan Brouder *et al.* (2001), que utilizaron en su investigación técnicas de interpolación para caracterizar la intensidad del muestreo para el manejo de P, K y pH, o la asociación entre propiedades del suelo y rendimiento de cultivos según Melchiori *et al.* (2000), Cassel *et al.* (2000), Stolt *et al.* (2001), entre otros; así mismo en el

Sistema de Agricultura de precisión, el uso de estas técnicas permite un buen manejo de cultivo, tal como lo expresan Melchiori *et al.* (2000) y O'Halloran (2001).

Mediante este concepto se han desarrollado técnicas que permiten la evaluación de la variabilidad del suelo, entre las que se cuentan las medidas descriptivas y de dispersión y el uso de técnicas geoestadísticas que permiten la modelación para evaluar la dependencia espacial de las propiedades del suelo y la interpolación espacial o elaboración de mapas que muestran el comportamiento de propiedades del suelo y que además permiten calcular el valor de un parámetro en sitios no muestreados, reduciendo así el costo excesivo del muestreo.

Mulla y McBratney (2000), indican que la variabilidad del suelo puede ser estimada mediante el muestreo continuo el cual utiliza generalmente técnicas de sensores remotos, las cuáles no se involucraron en la presente investigación; por otro lado el muestreo discreto, que va acompañado por la colección de muestras de suelo en puntos bien localizados y que para realizar una estimación de los parámetros del suelo utilizan las técnicas estadísticas mencionadas en el párrafo anterior y descritas a continuación.

3.3.1 Técnicas descriptivas para evaluar la variabilidad espacial. En el estudio de la variabilidad de las propiedades del suelo, se obtiene una gran cantidad de valores de una ó varias variables de estudio; esto permite realizar técnicas descriptivas de las variables mediante el uso de histogramas de frecuencia, en los que se hace una agrupación de valores mediante rangos predeterminados y se grafica con las frecuencias de datos que caen en dichos rangos. Así lo establecen Isaaks y Srivastava (1989) y Mendenhall y Sincich (1997), con la obtención de histogramas que muestran la distribución de frecuencias de la variable de estudio. Mulla y McBratney (2000), mencionan que la distribución de frecuencias puede estar distribuida de forma Normal ó No-Normal, siendo simétrica ó asimétrica cercana a la media respectivamente. Las distribuciones asimétricas pueden transformarse a

distribuciones normales mediante el logaritmo natural de los datos. Estos mismos autores mencionan como propiedades del suelo que pueden sufrir esta transformación, las propiedades hidráulicas, el contenido de nutrientes y concentraciones de elementos menores. La media y la varianza de los datos logarítmicamente transformados, pueden ser utilizados para obtener la media de los datos no transformados mediante la expresión según Webster y Olivier, citados por Mulla y McBratney (2000):

$$\bar{x} = \exp(m + 0.5s^2)$$

Donde:  $\bar{x}$  media de los datos no transformados;  $m$  media de los datos logarítmicamente transformados;  $s^2$  varianza de los datos logarítmicamente transformados.

El uso de medidas numéricas que resumen dichas distribuciones, es más utilizado en la descripción de las variables, tal es el caso de las medidas de tendencia central, las cuales describen el valor de la variable más representativo de la población muestreada, como son la media aritmética ó valor promedio, la mediana ó valor central de los datos ordenados y la moda ó valor más frecuente. La media aritmética se obtiene mediante:

$$m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Donde:  $n$  es el total de puntos muestreados;  $x_i$  es cada valor de la variable de estudio localizado en el punto  $i$ -ésimo;  $m$  valor de la media aritmética.

La mediana ó valor central de los datos ordenados, indica que 50% de los valores son menores a la mediana y 50% son mayores a ella.

Mulla y McBratney (2000), mencionan que la dispersión de los valores alrededor de la media, es una medida importante de la variabilidad de la población y se obtiene mediante la desviación estándar ( $\sigma$ ) que es la raíz cuadrada de la varianza ( $\sigma^2$ ), estimada como:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m)^2$$

Donde:  $\sigma^2$  varianza poblacional;  $n$  número de valores medidos;  $x_i$  valor de la variable  $x$  en la  $i$ -ésima posición;  $m$  media aritmética.

Otras medidas de dispersión son el rango ó diferencia entre el valor máximo y mínimo de los datos, rango intercuartílico ó diferencia entre el primer y tercer cuartil, y el coeficiente de variación que proporciona una medida normalizada de la dispersión de los datos con respecto a la media, según nos muestran Mulla y McBratney (2000):

$$CV = \frac{\sigma}{m} \times 100\%$$

Donde:  $CV$  coeficiente de variación medido en porcentaje;  $\sigma$  desviación estándar;  $m$  media aritmética.

Wilding, mencionado por Mulla y McBratney (2000), propuso un esquema de clasificación según el coeficiente de variación obtenido, siendo ésta: valores de CV de 0 a 15% poca variabilidad, de 16 a 35% variabilidad moderada y mayor a 36% alta variabilidad. En el Cuadro 1 se presenta la clasificación de variabilidad de acuerdo al valor de CV obtenido (Mulla y McBratney, 2000), con base en resultados obtenidos por diferentes investigadores.

Cuadro 1. Rangos en valores para el coeficiente de variación de algunas propiedades del suelo. Tomado de Mulla y McBratney (2000).

Propiedad	CV (%)	Magnitud de variabilidad
pH	2-15	Bajo
Porosidad	7-11	Bajo
Densidad aparente	3-26	Bajo a moderado
Rendimiento del cultivo	8-29	Bajo a moderado
% de arenas	3-37	Bajo a moderado
Contenido de materia orgánica	21-41	Moderado a alto
% de arcillas	16-53	Moderado a alto
N-NO <sub>3</sub>	28-58	Moderado a alto
Potasio disponible	39-157	Alto
Fósforo disponible	39-157	Alto
Conductividad eléctrica	91-263	Alto

3.3.2 Técnicas geoestadísticas. Warrick *et al.* (1986), manifiestan que la geoestadística inició en la ingeniería minera, como técnicas para problemas prácticos como es optimizar la selección de cuerpos minerales para ser procesados de

acuerdo a la demanda económica de la zona, pero la aplicación en la ciencia del suelo va en aumento, debido a la versatilidad de sus técnicas, ya que permite la elaboración de mapas, así como la evaluación de propiedades del suelo con relación a su espacio.

Isaaks y Srivastava (1989) y Armstrong (1998), mencionan que las características espaciales de las series de valores obtenidos en una región, tales como localización de valores extremos, tendencia general, ó grado de continuidad, no pueden ser evaluados mediante las técnicas de estadística descriptiva univariada ó bivariada, por lo que se hace uso de la geoestadística para captar esas características espaciales. Mulla y McBratney (2000) y Vega *et al.* (2001), indican que los datos espaciales, son medidas u observaciones realizadas en puntos ó áreas, referenciadas mediante latitud y longitud, y que al localizarse mediante coordenadas fijas es posible manejarlos como datos geoestadísticos. Por otra parte, una variable regionalizada es aquella que tiene valores en cada punto asociados a una escala espacial dentro de la región a estudiar. Estos valores están afectados por componentes estructurales (determinísticos), que reflejan la tendencia a gran escala y componentes aleatorios que incluyen irregularidades locales y el error de muestreo. Las variables incluidas en este estudio pueden considerarse como variables regionalizadas.

3.3.2.1 Cuantificación de la dependencia espacial. Cada una de las propiedades del suelo presenta una distribución diferente en el terreno en un plano de tres dimensiones, así mismo es posible apreciar una tendencia de los valores de las propiedades del suelo en alguna dirección del terreno ó cierto grado de continuidad, tal como lo mencionan Isaaks y Srivastava (1989). Cressie (2001) y Vega *et al.* (2001), indican que los datos geoestadísticos muestran variaciones a pequeña escala, la cual puede ser modelada por la autocorrelación espacial que es una función de la estructura espacial de una variable (Urban, 2003), e incorporada a procesos de estimación. Dichas variaciones espaciales pueden ser descritas

mediante un correlograma ó un variograma que consideran una serie de valores  $z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_n)$  localizados en  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , definidos en 1, 2 ó 3 dimensiones (Warrick *et al.*, 1986; Isaaks y Srivastava, 1989; Mulla y McBratney, 2000).

Por su parte, Urban (2003), menciona que una variable está autocorrelacionada si es posible predecir su valor en un punto dado en el espacio, por medio de valores conocidos de la variable en otros puntos en el espacio.

3.3.2.1.1 Correlograma. Warrick *et al.* (1986) e Isaaks y Srivastava (1989), mencionan que un correlograma es la serie de correlaciones para una variable común, donde cada par de datos  $x$  está separado una distancia  $h$ , siendo tanto  $x$  como  $h$  cantidades vectoriales y dependerán tanto de la dirección como de la magnitud de  $h$ . Un indicador alternativo de la continuidad espacial es la covarianza, utilizada en el proceso de correlograma. Warrick *et al.* (1986), presentan los siguientes supuestos para el correlograma:

Fuerte estacionalidad:

1.  $E[z(x)]$  existe y es igual al mismo valor constante para toda  $x$ .
2. La covarianza existe y es una función única de la distancia de separación  $h$ .

El correlograma de una variable  $z$  regionalizada queda definido como:

$$\rho(h) = \text{Cov}[Z(x), Z(x+h)] / \sigma^2$$

Donde:  $\rho(\ )$  valor de correlograma;  $\text{Cov}[\ ]$  covarianza entre dos valores muestreados;  $h$  distancia de separación entre dos puntos;  $Z(\ )$  valor de la variable en un punto muestreado;  $x$  posición de un punto en el terreno;  $\sigma^2$  varianza poblacional.

El correlograma puede tomar valores de  $-1$  a  $1$ , tal como un coeficiente de correlación ordinario. Este mismo autor (Warrick *et al.*, 1986), menciona que para estimar esta función de correlograma se asume que  $n(h)$  es el número de pares de puntos muestreados a una distancia  $h$  y que la función de covarianza muestral queda definida como:

$$C(h) = \left[ \frac{1}{n(h)-1} \right] \sum_{i=1}^{n(h)} [Z(x_i) - \bar{Z}] [Z(x_i + h) - \bar{Z}]$$

Donde:  $C()$  covarianza muestral;  $n$  número de puntos muestreados;  $h$  distancia de separación entre dos puntos;  $Z()$  valor de la variable en un punto muestreado;  $x_i$  posición de un punto en el terreno;  $\bar{Z}$  media aritmética de los valores de la variable.

En esta expresión se supone estacionalidad, esto es, que la correlación sólo depende de la distancia de separación  $h$  entre dos puntos muestreados, según Sampson (2001), y el correlograma muestral es:

$$r(h) = C(h) / s^2$$

Donde:  $r()$  correlograma muestral;  $h$  distancia de separación entre dos puntos;  $s^2$  varianza muestral; con  $\bar{Z}$  y  $s^2$  como estimadores de la media y la varianza.

Para evaluar la autocorrelación espacial es frecuente el uso del Coeficiente  $I$  de Moran, así como el Coeficiente  $c$  de Geary, según Fortín, *et al.* (2001) y Urban (2003), explicando que el Coeficiente  $I$  de Moran indica el grado de correlación entre

los valores de una variable como función de separaciones espaciales; tal coeficiente se obtiene mediante la ecuación:

$$I(d) = \frac{n \sum_i \sum_j w_{ij} z_i z_j}{W \sum_i z_i^2}$$

Donde:  $w_{ij}$  es el factor de ponderación a la distancia  $d$ , tal que,  $w_{ij}=1$  si el punto  $j$  está dentro de la clase de distancias  $d$  desde el punto  $i$ , de otra forma  $w_{ij}=0$ ;  $z$ 's son las desviaciones ( $z_i = y_i - \bar{y}$ ), y  $W$  es la suma de todas las ponderaciones para toda  $i \neq j$ . El numerador de la ecuación es un producto cruzado ó covarianza, mientras que el denominador es una varianza, con lo que este coeficiente  $I$  de Moran se comporta como el producto-momento de correlación tal como el coeficiente  $r$  de Pearson, tan comúnmente utilizado.

Estos mismos autores mencionan que el Coeficiente  $c$  de Geary, representado con la ecuación:

$$c(d) = \frac{(n-1) \sum_i \sum_j w_{ij} (y_i - y_j)^2}{2W \sum_i z_i^2}$$

y con la misma definición de términos que en la ecuación anterior, es utilizado para la descripción de autocorrelación en el análisis espacial. Un valor de 1 indica que no existe correlación, 0 indica correlación positiva y valores mayores a 1 indican correlación negativa. Urban (2003), indica que la mayoría de los investigadores en ciencias de ecología aplicada recomiendan el coeficiente  $I$  de Moran para generar las

gráficas de correlogramas, debido a que este coeficiente permite describir más claramente algunos patrones presentes en el análisis espacial.

3.3.2.1.2 Semivariograma. Warrick *et al.* (1986), Isaaks y Srivastava (1989), Cristóbal *et al.* (1996) y Mulla y McBratney (2000), mencionan que la dependencia espacial puede ser cuantificada y modelada por el semivariograma, el cual es estimado mediante la ecuación:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z_i - z_{i+h}]^2$$

Donde:  $h$  es la distancia de separación entre los puntos  $x_i$  y  $x_{i+h}$ ,  $z_i$  y  $z_{i+h}$  son los valores medidos para la variable regionalizada en los puntos  $x_i$  ó  $x_{i+h}$ , y  $n(h)$  es el número de pares en cualquier distancia de separación  $h$ . El semivariograma es una medida cuantitativa de cómo la varianza entre puntos muestreados, se reduce cuando la distancia de separación disminuye. El semivariograma experimental, según indican Cristóbal *et al.* (1996), para una cierta dirección se obtiene al graficar los valores de  $\gamma(h)$  contra los valores del intervalo  $h$ . Teóricamente la semivarianza aumenta con el incremento de la distancia entre los puntos muestreados, alcanzando un valor constante denominado "umbral" o "meseta" (*sill* en inglés), a una cierta distancia llamada "rango" (*range* en inglés), el cual marca el alcance en unidades de longitud, de dependencia espacial. Este Rango puede categorizarse en Corto, Moderado y Largo, según se muestra en el Cuadro 2.

Así mismo, teóricamente el semivariograma experimental debe pasar a través del origen cuando la distancia de separación es cero; sin embargo, varios factores como son errores de muestreo y escala pequeña de variabilidad, pueden provocar que valores de muestras separadas por mínimas distancias, sean ligeramente diferentes, tal es el caso de varias propiedades del suelo que presentan una semivarianza

diferente de cero cuando la distancia de separación es cero. Esta magnitud es llamada "efecto pepita" (*nugget* en inglés y haciendo alusión al origen de la geoestadística que inició en la industria minera), es la medida de la discontinuidad en el origen. La relación encontrada entre el efecto pepita y el umbral, dada en porcentaje se conoce como el efecto pepita relativo.

Cuadro 2. Variación en el parámetro Rango para los modelos de semivariogramas de propiedades del suelo seleccionadas. Tomado de Mulla y McBratney (2000).

Propiedad del suelo	Rango (m)	Dependencia Espacial
Conductividad hidráulica saturada	1-34	Rango corto
% Arena	5-40	Rango corto
Contenido de agua saturada	14-76	Rango corto a moderado
pH del suelo	20-260	Rango corto a largo
Rendimiento del cultivo	70-700	Rango moderado a largo
Nitrógeno nítrico del suelo	40-275	Rango moderado a largo
Potasio disponible en el suelo	75-428	Rango moderado a largo
Fósforo disponible en el suelo	68-260	Rango moderado a largo
Contenido de materia orgánica	112-250	Rango largo

Cuando el semivariograma sólo se ve afectado en función de la distancia de separación de los puntos, independientemente de la orientación de los puntos incluidos, se dice que es isotrópico u omnidireccional. Si se encuentra en función, tanto de la distancia de separación como de la orientación en el terreno, el semivariograma se considera anisotrópico ó direccional, y puede ser zonal cuando el umbral varía con la dirección, ó geométrico cuando el rango varía con la orientación,

aunque puede presentarse el caso de que una variable del suelo presente los dos tipos de anisotropía. La anisotropía se ha encontrado en aquellos casos en los que el material madre del suelo, la topografía ó alguna característica notable, afecta el valor de algunas propiedades del suelo. Esto generalmente se presenta en estudios de grandes extensiones donde se pueden encontrar áreas con características visiblemente diferentes.

El análisis de dependencia espacial, generalmente inicia con un semivariograma omnidireccional ó isotrópico, ya que éste contiene más pares de muestras que uno direccional, de tal forma que es posible identificar en un mapa de contorno de varianzas, si existe continuidad espacial de la variable a todo lo ancho y largo del área de estudio, identificando si hay una tendencia de un gradiente suave de variabilidad (máxima continuidad), y un gradiente fuerte de variabilidad (mínima continuidad), ó bien en caso de no presentarse esto, se considera el semivariograma como omnidireccional.

Cristóbal *et al.* (1996), mencionan que para facilitar los cálculos de estimación, el semivariograma experimental se sustituye por modelos matemáticos continuos que incluyen como datos el valor de pepita representado por  $C_0$ ; valor del umbral representado por  $C_0+C$ ; el rango, representado por  $a$  y la distancia de separación entre puntos, representada por  $h$ . Entre los modelos más utilizados están:

Modelo lineal, representado como:

$$\gamma(h) = C_0 + C(h/a), \quad h < a$$

$$\gamma(h) = C_0 + C, \quad h \geq a$$

Modelo exponencial, representado como:

$$\gamma(h) = C_0 + C[1 - \exp(-h/a)], \quad h > 0$$

Modelo esférico, representado como:

$$\gamma(h) = C_0 + C[3/2(h/a) - 1/2(h/a)^3], \quad 0 < h < a$$

$$\gamma(h) = C_0 + C, \quad h > a$$

En algunos casos, pueden presentarse los modelos Gaussiano, Potencial y Logarítmico, según lo mencionado por Warrick *et al.* (1986) e Isaaks y Srivastava (1989), establecidos por las siguientes ecuaciones:

Modelo Gaussiano:

$$\gamma(h) = 1 - \exp\left(-\frac{3h^2}{a^2}\right)$$

Modelo de Potencias:

$$\gamma(h) = h^\alpha; \quad 0 < \alpha < 2$$

Modelo Logarítmico:

$$\gamma(h) = \text{Log } h$$

Cuando se presenta un fuerte efecto pepita (Isaaks y Srivastava, 1989), esto es, que es muy alta la variabilidad de muestras en distancias muy cortas (cercanas a cero), el valor de la semivarianza se obtiene mediante el modelo de efecto pepita puro, con la siguiente ecuación:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } h=0 \\ C_0 & \text{si } h>0 \end{cases}$$

Un modelo de efecto pepita puro, (efecto pepita relativo cercano al 100%), involucra una completa falta de correlación espacial, esto es, un valor en una localización particular no presenta similitud con los valores en localidades vecinas.

Warrick *et al.* (1986), manifiestan que la selección del mejor modelo, muchas veces es subjetiva, pero que se pueden tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- 1) Utilizar una forma funcional que tenga un rango de aplicación.
- 2) Dar mayor credibilidad a aquéllos que tengan mayor número de pares  $n(h)$  en la determinación.
- 3) Prestar mayor atención a aquéllos con distancias cortas.

Una vez definido el modelo, se hace una prueba de validación del mismo, siguiendo algún método ya establecido. Isaaks y Srivastava (1989), refieren la validación cruzada como un método adecuado, ya que permite comparar valores estimados con valores verdaderos, utilizando para ello la información disponible de la serie de datos correspondiente a la investigación. Una gráfica cuantil-cuantil (valores observados contra valores estimados), muestra los residuales obtenidos mediante esta técnica,

de tal manera que puedan observarse desviaciones marcadas cuando el modelo no es el de mejor ajuste. Cuando la curva de esperanza condicional cae muy cercana a la línea de 45°, las estimaciones serán condicionalmente insesgadas y el modelo originará un mapa de interpolación confiable.

3.3.2.2 Interpolación espacial. El estudio de la variabilidad espacial, conlleva a la elaboración de mapas que muestran dicha variabilidad, con esta representación es posible estimar valores para aquéllos sitios en los cuales no se tomó una muestra. En la práctica es imposible muestrear en todos los sitios, así como el excesivo costo de un muestreo demasiado intenso, hacen que la interpolación espacial sea una técnica muy útil que nos permite obtener valores en los puntos no muestreados. El método de interpolación seleccionado, deberá permitir lograr una estimación lo más confiable posible, evitando así una sobre ó subestimación.

Cristóbal *et al.* (1996), mencionan como posibles métodos de interpolación el de distancias inversas al cuadrado, en el que se realiza una ponderación de los valores en base a las distancias de separación entre los puntos; placa delgada, que se basa en la minimización de la energía de flexión de una placa delgada que es forzada a pasar a través de todos los puntos dato; y el kriging, considerado el mejor estimador lineal insesgado, debido a que minimiza la varianza del error. Esto es corroborado para aquellos sitios no muestreados en varios estudios (Cristóbal *et al.* 1996; y Mulla y McBratney 2000).

La estimación realizada por el método de interpolación kriging, hace uso de los modelos de semivarianza mencionados. Dicha estimación puede ser desarrollada para obtener el valor de la variable en un punto no muestreado, mediante kriging puntual ú ordinario; en una área no muestreada, mediante kriging de bloques; ó bien para estimar los valores de una variable fuertemente correlacionada con dos ó más variables, mediante co-kriging.

3.3.2.2.1 Kriging puntual. Según describen Mulla y McBratney (2000), el kriging puntual ú ordinario, es un interpolador lineal, que suma los valores ponderados de los vecinos muestreados para un punto no muestreado y utiliza la expresión:

$$z_0 = \sum_{i=1}^N \lambda_i z_i$$

Donde:  $z_0$  es el valor interpolado,  $N$  es el número de vecinos del punto a interpolar,  $z_i$  son los valores medidos de los puntos vecinales y  $\lambda_i$  es el factor kriging ponderado para cada uno de los valores vecinales conocidos.

Este factor de ponderación se obtiene mediante el modelo de semivariograma, utilizando para ello notación matricial y multiplicador de Lagrange con los valores medidos de los puntos vecinales que se encuentran a la distancia de separación  $h$ . Para más detalle consultar a Warrick *et al.* (1986), Isaaks y Srivastava (1989) y Mulla y McBratney (2000).

3.3.2.2.2 Kriging de bloques: La estimación de los valores en puntos no muestreados en un área se realiza mediante un promedio con los valores de los puntos vecinales muestreados. El proceso es similar al del kriging puntual, ya que se realiza la ponderación de valores vecinales tanto dentro del área en cuestión ó bloque, como fuera de ella. Para la obtención de tales estimados Isaaks y Srivastava (1989), indican que uno de los métodos es dividir el área a estimar en varios puntos y promediar los estimados puntuales individuales todos juntos para obtener el promedio del área total.

El sistema de kriging de bloques puede escribirse como:

$$\mathbf{C} \cdot \mathbf{w} = \mathbf{D}$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{C}_{11} & \dots & \tilde{C}_{1n} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \tilde{C}_{n1} & \dots & \tilde{C}_{nn} & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ \vdots \\ w_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{C}_{1A} \\ \vdots \\ \tilde{C}_{nA} \\ 1 \end{bmatrix}$$

Donde: la matriz **C** son los valores de covarianza entre los valores de la variable  $y_i$  y  $y_j$  en las zonas muestreadas; el vector **D** consiste en valores de covarianza entre los valores promedio del área de la variable en zonas muestreadas y la variable en la zona no muestreada, es decir el valor a ser estimado; el vector **w** consiste de los factores kriging de ponderación  $w_1, \dots, w_n$  y el parámetro de Lagrange  $\mu$ .

Una vez obtenidos los factores de ponderación, Mulla y McBratney (2001) recomiendan que se haga uso de la siguiente ecuación:

$$z_0(A) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z_i$$

Donde:  $z_0(A)$  es el valor promedio interpolado para el bloque o área  $A$ ,  $N$  es el número de vecinos del punto a interpolar,  $z_i$  son los valores medidos de los puntos vecinales y  $\lambda_i$  es el factor kriging ponderado para cada uno de los valores vecinales conocidos. En el kriging de bloques se utiliza un semivariograma promedio entre los puntos muestreados. Estos mismos autores expresan que una de las ventajas del kriging de bloques es que las varianzas de estimación son mucho menores que las obtenidas mediante el kriging puntual.

3.3.2.2.3 Co-kriging: Es una técnica de interpolación, según indican Mulla y McBratney (2000), que utiliza información sobre patrones espaciales de dos variables espacialmente correlacionadas, para interpolar sólo una de ellas. Comúnmente se utiliza para mapear aquellas propiedades del suelo que son costosas de analizar, mediante el análisis de la variable que es más fácil ó menos costosa de obtener, como ejemplo la evaluación de niveles de fósforo mediante los valores medidos de carbono orgánico en un muestreo intensivo. La interpolación en el método de co-kriging se realiza mediante la ecuación:

$$z_{2,0} = \sum_{i=1}^{N_1} \lambda_{1,i} z_{1,i} + \sum_{i=1}^{N_2} \lambda_{2,i} z_{2,i}$$

Donde:  $z_{2,0}$  es el valor interpolado de la propiedad 2 ó propiedad a estudiar. En el co-kriging se requiere del uso del semivariograma cruzado, estimado mediante la siguiente expresión:

$$\gamma_{12}(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} [z_{1i} - z_{1,i+h}] [z_{2i} - z_{2,i+h}]$$

Donde:  $z_{1i}$  y  $z_{1,i+h}$  son los valores medidos para la propiedad 1; y  $z_{2i}$  y  $z_{2,i+h}$  son los valores medidos para la propiedad 2.

En todos los casos, el cálculo de las interpolaciones implica un proceso muy largo por lo que es indispensable el uso de paquetes computacionales especializados.

Entre el software existente se encuentran IDRISI, ArcView, ARC-INFO, GEOMEDIA, etc., los cuales permiten la elaboración de mapas por interpolación, en la gran mayoría se cuenta con un módulo para cálculos geoestadísticos. También existe software especializado en geoestadística como GS+, GSLIB, ISATIS, VARIOWIN, GeoEAS, entre otros.

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Características de las parcelas de estudio

#### 4.1.1 Parcela Atequiza.

4.1.1.1 Localización. La parcela Atequiza se encuentra localizada dentro del poblado con el mismo nombre, en el municipio de Ixtlahuacán de los Membrillos, en las coordenadas 20° 25' latitud Norte, 103° 13' longitud Oeste y una altitud de 1540 msnm. La parcela tiene una superficie de 4.7 ha (Figura 1).

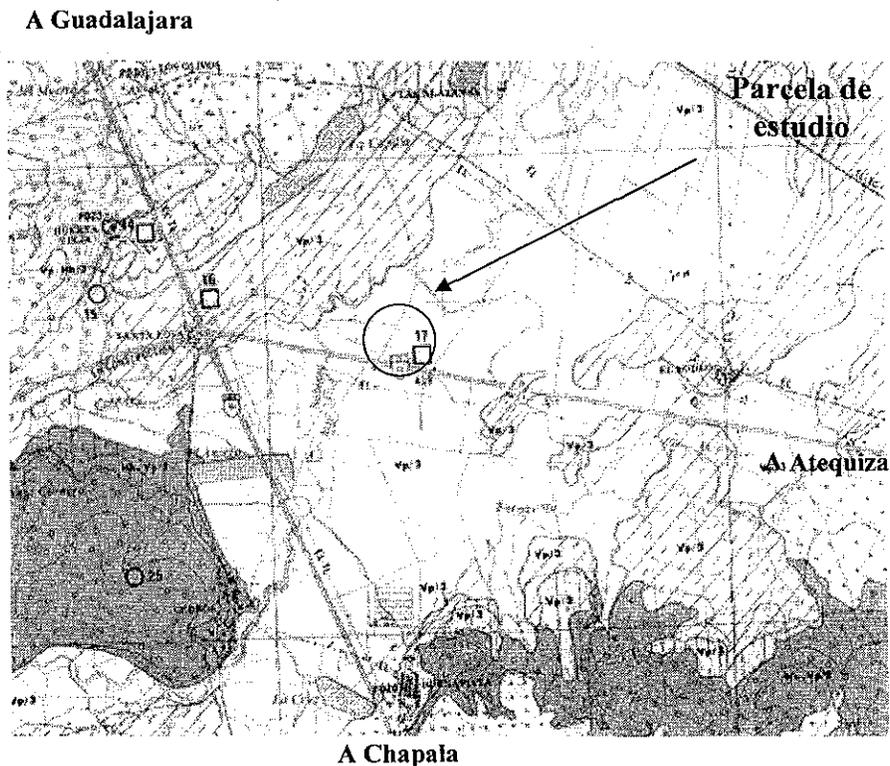


Figura 1. Localización de la parcela Atequiza.

4.1.1.2 Clima. En la zona se presenta una temperatura media anual de 20.5° C, temperatura mínima media de 12.3°C, temperatura máxima media de 28.8°C, con precipitación anual de 849.8 mm, una evaporación anual de 2203 mm y humedad relativa media anual de 55.1%, con un clima (A)Ca(w<sub>o</sub>)(w)(e)g, según clasificación de Köppen modificada por Enriqueta García (García, 1987), clasificado como

semicálido, templado con verano cálido, con lluvias en verano, oscilación térmica extrema (Ruiz *et al.*, 2003).

4.1.1.3 Suelo. El suelo en esta zona de estudio está clasificado como *Vertisol pélico*, con clase textural fina, sin fase, según clasificación de suelos FAO-UNESCO modificada por CETENAL (INEGI, 1974).

4.1.1.4 Manejo agrícola. La parcela se ha estado utilizando un sistema de rotación maíz-sorgo, con rendimientos medios de 12 ton/ha para maíz, diferentes variedades, y 14 ton/ha para sorgo Convar D-65.

#### 4.1.2 Parcela Villa Corona.

4.1.2.1 Localización. Se encuentra localizada en el poblado Villa Corona en el municipio del mismo nombre, en las coordenadas 20° 26' de latitud Norte, 103° 41' de longitud Oeste y una altitud de 1390 msnm. La superficie de la parcela es de 2.6 ha (Figura 2).

4.1.2.2 Clima. Se presenta una temperatura media anual de 18.6° C, con una mínima media de 9.2°C y una máxima media de 28°C, una precipitación anual de 829.4 mm, evaporación anual de 1939.8 mm y una humedad relativa media anual de 48.6%. El clima en esta zona queda clasificado como (A)Cb(w<sub>1</sub>)(w)(i'), según clasificación climática de Köppen modificado por Enriqueta García (García, 1987), como semicálido, templado con verano fresco largo, con lluvias de verano intermedias, con poca oscilación térmica (Ruiz *et al.*, 2003).

4.1.2.3 Suelo. El suelo en esta área se clasifica como *Phaeozem háplico* predominantemente con *Regosol éutrico* como secundario, con clase textural media y fase lítica profunda (INEGI, 1974).

4.1.2.4 Manejo agrícola. La parcela de estudio había sido utilizada para el cultivo de caña de azúcar con sistema de riego por gravedad, pero en el ciclo previo a este estudio se utilizó para el cultivo de maíz.

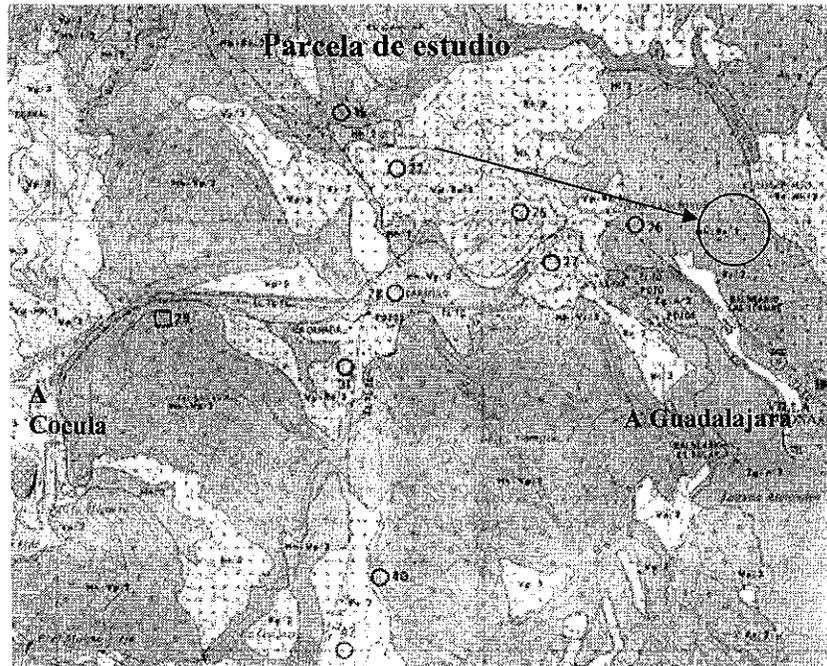


Figura 2. Localización de la parcela Villa Corona.

#### 4.1.3 Parcela Zapopan.

4.1.3.1 Localización. La parcela Zapopan se encuentra localizada en el predio Las Agujas en el municipio de Zapopan, con las coordenadas  $20^{\circ} 44'$  de latitud Norte,  $103^{\circ} 30'$  de longitud Oeste y una altitud de 1670 msnm. La parcela tiene una superficie de 3.9 ha (Figura 3).

4.1.3.2 Clima. Tiene una temperatura media anual de  $19.6^{\circ}\text{C}$ , temperatura mínima media de  $12.3^{\circ}\text{C}$ , temperatura máxima media de  $26.8^{\circ}\text{C}$ , presenta una precipitación anual de 979.6 mm, evaporación anual de 2193.8 mm y humedad relativa media anual de 60.6%, con una clasificación climática de  $(A)Ca(w_1)(w)(i)g$ ,

según Köppen modificado por Enriqueta García (García, 1987), quedando descrito como semicálido, templado con verano cálido, lluvias en verano intermedias, con poca oscilación térmica (Ruiz *et al.*, 2003).

4.1.3.3 Suelo. El tipo de suelo predominante en esta zona es *Regosol éutrico* con clase textural gruesa y fase lítica profunda (INEGI, 1974).

4.1.3.4 Manejo agrícola. Esta parcela se ha utilizado para el cultivo de maíz con rendimientos de 6 a 7 ton/ha bajo el sistema denominado "Sistema Zapopano".

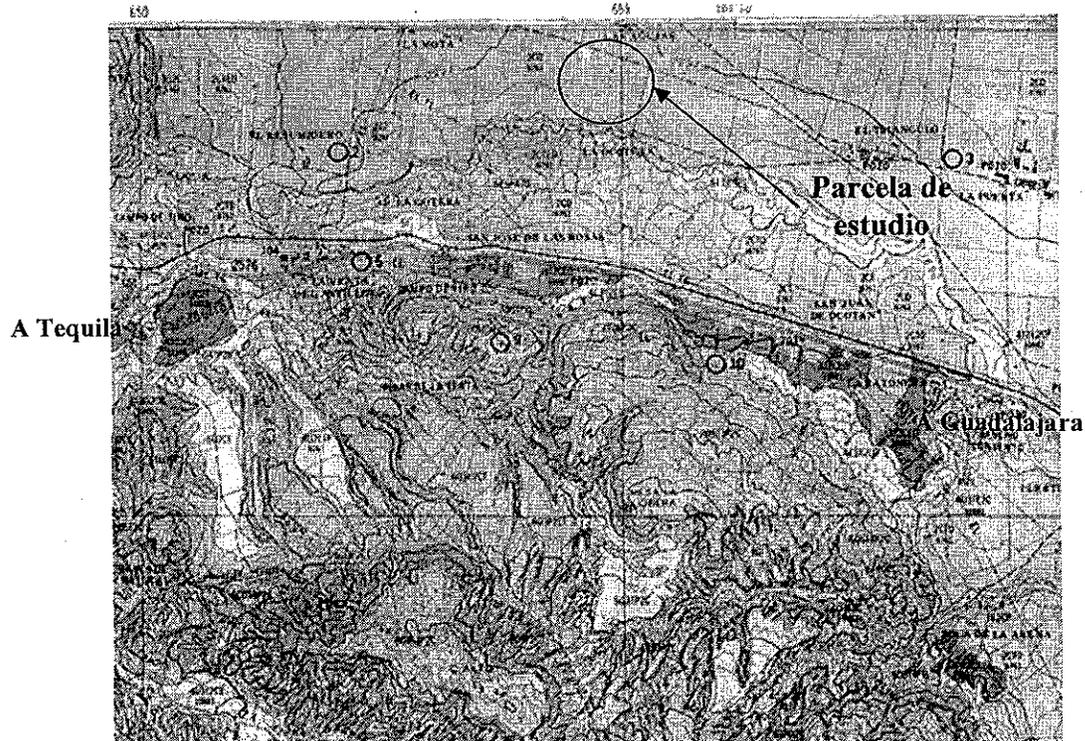


Figura 3. Localización de la parcela Zapopan.

4.2 Actividades para toma de muestras en el campo..

4.2.1 Materiales. Teodolito con nivel, estadal, baliza, fichas para marcar puntos GPS, posicionador geográfico Garmin Etrex Legend System, barrena de cilindro, cinta de 50 m, bolsas de plástico, hilaza, etiquetas, potenciómetro de bolsillo.

#### 4.2.2 Metodología del muestreo.

4.2.2.1 Muestreo preliminar. Consistió en un muestreo sobre una parcela de 1 ha, para obtener las dimensiones de la cuadrícula del muestreo final, mediante la varianza que arroja el pH del suelo tomado en campo con potenciómetro portátil y en una cuadrícula con dimensiones de 40x40 m según recomendación en literatura. El valor de varianza resultante fue de 0.573304, y que para obtener el tamaño de muestra fue utilizado en la ecuación:

$$n = \frac{z^2 \sigma^2}{B^2}$$

Donde:  $z = 1.96$  para  $\alpha 0.05$ ,  $\sigma^2=0.573304$  y  $B$  error de estimación de 0.3 unidades de pH; obteniendo como resultado una  $n=24.47$  por lo que se consideró un total de 25 muestras por hectárea que corresponden a una cuadrícula de 20x20 m, con este número de puntos muestreados se alcanza el nivel de confianza del 95% y se puede tener un error máximo de estimación de 0.3 unidades. En caso de tenerse más puntos por unidad de superficie disminuye el error máximo de estimación. Una cuadrícula de estas dimensiones puede ser adecuada para todas las variables incluidas en este estudio, considerando que con fines de evaluación de la fertilidad esta distancia entre puntos es adecuada. Entre las investigaciones que manejan estas dimensiones se encuentran *Vieira et al.*, (2002) y *Stutter et al.* (2004).

4.2.2.2 Muestreo sistemático. Se georreferenció un vértice de cada parcela mediante el GPS y a partir de este punto se procedió a trazar una cuadrícula con dimensiones de 20x20 m, colocando fichas en cada intersección. Se tomó una muestra compuesta por 10 submuestras obtenidas aleatoriamente en un radio de 3 m alrededor de cada intersección de la cuadrícula, según Figura 4.

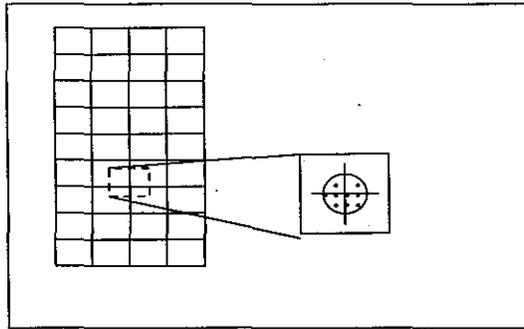


Figura 4. Toma de submuestras aleatorias en la cuadrícula trazada en el terreno.

Se tuvo cuidado de trazar la cuadrícula considerando las recomendaciones del muestreo de suelo de tomar muestras alejadas 10 metros de caminos, arroyos, árboles, construcciones, ó cualquier objeto que pudiera alterar el resultado por incluir puntos no representativos. El total de muestras para cada parcela de estudio fue de 98 para la parcela Atequiza, 50 para la parcela Villa Corona y 78 para la parcela Zapopan (Figuras 5, 6 y 7).

#### 4.3 Actividades desarrolladas en el laboratorio.

El análisis de las muestras se llevó a cabo en el Laboratorio de Agrología del Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de la Universidad de Guadalajara, en el área correspondiente a investigación, mediante las técnicas recomendadas por la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, con excepción del tamaño de partículas, que se realizó en base a técnicas de manejo a nivel internacional, como se menciona en el apartado correspondiente.

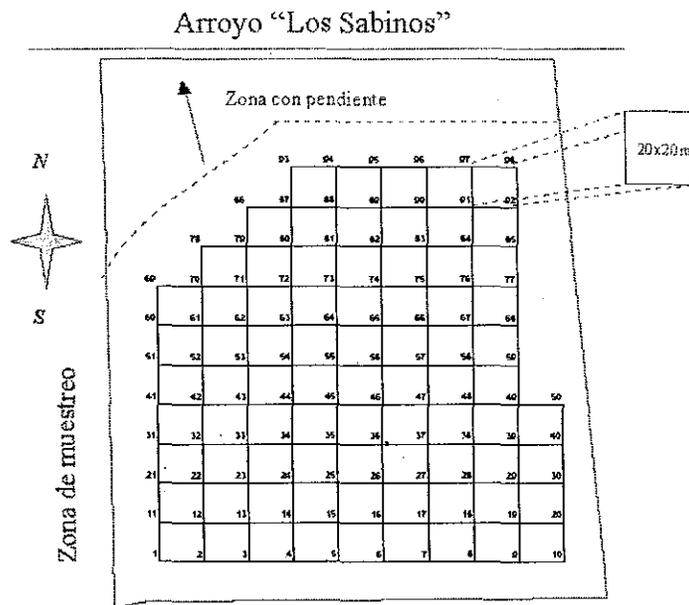


Figura 5. Localización de los puntos muestreados en la cuadrícula de dimensiones 20x20 m en la parcela de Atequiza.

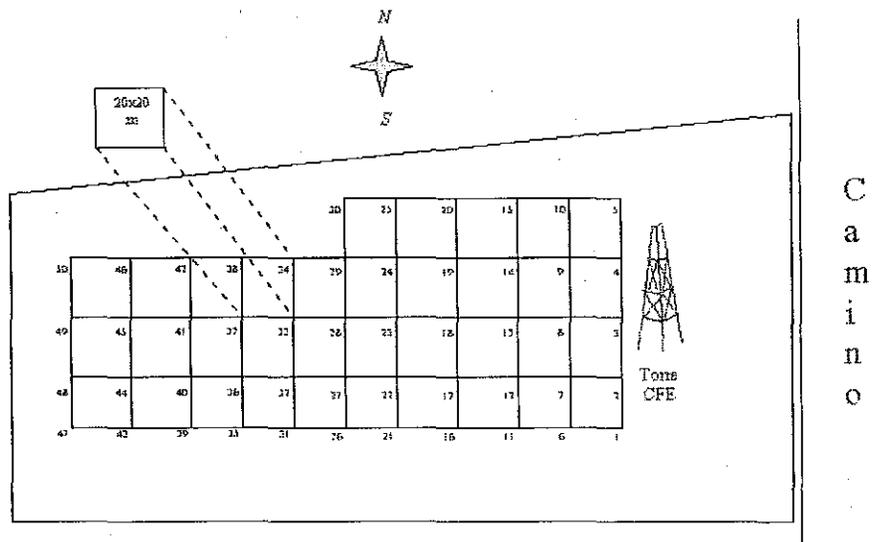


Figura 6. Localización de los puntos muestreados en la cuadrícula de dimensiones 20x20m en la parcela de Villa Corona.

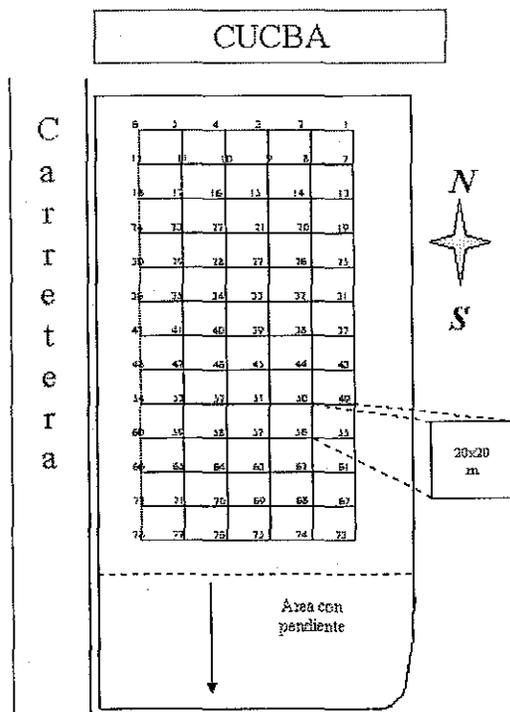


Figura 7. Localización de los puntos muestreados en la cuadrícula de dimensiones 20x20 m en la parcela de Zapopan.

4.3.1 Material y equipo utilizado: tamiz de plástico de 2mm, mazo de madera, charolas para secado de muestras al aire, botes de plástico para almacenamiento de muestras, potenciómetro marca Beckman, campana de extracción de vapores, tren Kjeldahal de destilación, flamómetro Corning EEL, espectrofotómetro Spectronic 20 Bausch & Lomb, agitador orbital marca TEMA 1245, balanzas analíticas Sauter y PRECISA 620C, tren de extracción, bomba de vacío Koblenz, dispersoras eléctricas marca Oster, parrilla Thermolyne, matraces Erlenmeyer de varios tamaños, buretas, probetas, embudos de vidrio, embudos Buchner, agitadores de vidrio, gradilla, vasos de precipitados varios tamaños, cápsulas Gooch, frascos de vidrio con tapa varios tamaños.

#### 4.3.2 Metodología en laboratorio.

4.3.2.1 Preparación de las muestras. Una vez tomadas las muestras de suelo en campo, se trasladaron inmediatamente al laboratorio, donde se procedió a extenderlas en charolas forradas con papel y puestas a secar al aire en la sombra. Se fracturaron físicamente con mazo de madera y se tamizaron en tamiz de plástico de 2 mm, guardándolas en frascos de plástico y registrándolas de acuerdo al procedimiento usual en el laboratorio. Así se formó un Banco de muestras de aproximadamente 500 g de suelo por muestra, para cada parcela de estudio.

Cuadro 3. Técnicas analíticas utilizadas en la determinación de los parámetros del suelo a estudiar.

<i>Parámetro del suelo a medir</i>	<i>Técnica utilizada</i>	<i>Referencia</i>
pH	Potenciómetro relación 1:2 suelo:CaCl <sub>2</sub> 0.01M	Goijberg y Aguilar, 1987
Materia Orgánica	Combustión húmeda, Walkley y Black	León y Aguilar, 1987
Capacidad de Intercambio Catiónico	Acetato de Amonio pH 7.0	Aguilar, 1987
P aprovechable	Bray y Kurtz (Bray 1)	Cajuste, 1987
Tamaño de partículas	Hidrómetro de Bouyoucos	Gee y Bauder, 1986; León-Arteta, 2001

4.3.2.2 Técnicas analíticas. Las técnicas analíticas utilizadas en la determinación de los parámetros del suelo a estudiar se presentan en el Cuadro 3. Se seleccionaron de acuerdo a las recomendaciones hechas por la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo.

#### 4.4 Proceso de la información.

##### 4.4.1 Equipo utilizado.

Computadora Satellite TOSHIBA

Computadora ALASKA Pentium 4

EXCEL© 98 con módulo estadístico de Prentice Hall

Software GS+ v 7.0 (Gamma, 2004)

Software MINITAB Release 14 (MINITAB, 2003)

Software WORD de WINDOWS

##### 4.4.2 Captura y validación de los datos.

Los datos recabados en cada sitio de muestreo provienen de las determinaciones simples practicadas sobre la muestra compuesta como fue señalado en el apartado 4.2.1.2 de este documento, para algunos casos se repitió la determinación tratando de evitar errores analíticos. Los datos fueron organizados en forma bidimensional atendiendo a los valores de la cuadrícula para cada parcela. Una vez obtenida esta información, se procedió a la captura en EXCEL, obteniéndose la estadística descriptiva de cada variable, tanto en valores numéricos como gráficos; así mismo se realizaron las pruebas de Normalidad para cada una de las variables, mediante la técnica de Kolmogorov-Smirnov, utilizando el software estadístico MINITAB release 14 (MINITAB 2003).

4.4.2.1 Análisis de correlación. Se calculó la matriz de correlación incluyendo a todas las variables (Mendenhall y Sincich, 1997; Zar, 1999). Con estos resultados es factible verificar algunas relaciones entre éstas que han sido ampliamente estudiadas y también se le puede dar uso para la interpolación mediante el procedimiento Co-kriging.

4.4.2.2 Dependencia espacial. Se procedió a la obtención de Semivariogramas, utilizando el software GS+ v 7.0 (Gamma, 2004). Una vez obtenido el mejor modelo con base en el coeficiente de determinación  $r^2$  y la suma de cuadrados de residuales (Gamma, 2004), se procedió a la validación del mismo mediante la técnica de validación cruzada. De los modelos ya probados se seleccionaron aquellos que resultaron con una  $r^2$  mayor a 0.5 en el modelo y  $r^2$  mayor a 0.4 en la validación cruzada por considerarse modelos de mejor ajuste; de esta manera se procedió a la interpolación (Isaaks y Srivastava, 1989).

4.4.2.3 Interpolación. Para la elaboración de mapas de contorno de los parámetros a estudiar, se utilizó el método de interpolación kriging de bloques, según lo recomendado por Isaaks y Srivastava, (1989) y Mulla y McBratney (2000). Este procedimiento se realizó mediante el software GS+ v 7.0 (Gamma, 2004).

## 5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### 5.1 Análisis de estadística descriptiva.

En el Cuadro 4 se presentan los valores descriptivos para la parcela Atequiza. Los valores medios para las variables estudiadas se pueden considerar como: de pH moderadamente ácido (5.53); nivel medio del porcentaje de materia orgánica (2.64%); con alta capacidad de intercambio catiónico (42.98 meq/100 g); nivel moderadamente bajo para P-Bray (17.05 ppm); y, valor alto del porcentaje de arcilla (40.13%), (Castellanos *et al.* 2000). Respecto a la variabilidad, destaca el coeficiente de variación del P-Bray (32.22%), en tanto que para las demás es menor de 15%.

Cuadro 4. Estadística descriptiva de las 98 muestras de la parcela Atequiza.

Parámetro	pH	% MO*	CIC*	P-Bray	% arcilla
Coficiente de asimetría	-0.25	0.43	-0.06	0.84	-0.43
Curtosis	-0.105	0.272	-0.685	2.359	0.339
Media	5.53	2.64	42.98	17.05	40.13
Nivel de confianza (95.0%)	0.03	0.07	0.72	1.10	0.88
Error típico	0.02	0.04	0.36	0.55	0.45
Mínimo	5.15	1.90	34.95	5.50	27.64
Cuartil 1	5.43	2.40	40.48	13.13	37.73
Mediana	5.54	2.65	42.62	17.00	40.00
Cuartil 3	5.62	2.82	45.62	21.00	42.63
Máximo	5.84	3.63	49.72	40.00	48.36
Moda	5.49	2.53	45.32	21.00	39.64
Rango	0.69	1.73	14.77	34.5	20.72
Desviación estándar	0.15	0.36	3.58	5.49	4.41
Varianza de la muestra	0.02	0.13	12.82	30.16	19.43
CV	2.71	13.70	8.33	32.22	10.98

\* MO indica el porcentaje de materia orgánica y CIC la capacidad de intercambio catiónico.

En el Cuadro 5 se presentan los valores descriptivos para la parcela Villa Corona. Los valores medios para las variables estudiadas se pueden considerar como: de pH ácido (4.63); nivel alto del porcentaje de materia orgánica (3.38%); con media capacidad de intercambio catiónico (17.90 meq/100 g); nivel medio para P-Bray (23.75 ppm); y, valor moderadamente bajo del porcentaje de arcilla (14.22%), (Castellanos *et al.* 2000). Respecto a la variabilidad, destacan los coeficientes de variación: del P-Bray (35.50%); y, de la arcilla (22.55%).

Cuadro 5. Estadística descriptiva de las 50 muestras de la parcela Villa Corona.

Parámetro	pH	% MO	CIC	P-Bray	% R
Coefficiente de asimetría	0.09	0.80	0.55	0.27	0.82
Curtosis	-1.015	1.622	0.493	1.151	0.099
Media	4.63	3.38	17.90	23.75	14.22
Nivel de confianza (95.0%)	0.15	0.15	0.71	2.40	0.91
Error típico	0.07	0.07	0.35	1.19	0.45
Mínimo	3.72	2.30	13.86	8.50	9.72
Cuartil 1	4.25	3.02	16.12	18.75	11.72
Mediana	4.56	3.36	17.71	25.50	13.72
Cuartil 3	5.02	3.67	19.75	28.75	15.72
Máximo	5.55	5.16	25.52	51.50	22.72
Moda	4.46	3.02	17.82	28.00	13.72
Rango	1.83	2.86	11.66	43	13
Desviación estándar	0.53	0.53	2.50	8.43	3.20
Varianza de la muestra	0.28	0.28	6.24	71.10	10.24
CV	11.37	15.54	13.96	35.50	22.50

\* MO indica el porcentaje de materia orgánica y CIC la capacidad de intercambio catiónico.

En el Cuadro 6 se presentan los valores descriptivos para la parcela Zapopan. Los valores medios para las variables estudiadas se pueden considerar como: de pH ácido (5.17); nivel moderadamente bajo del porcentaje de materia orgánica (1.74%);

con capacidad de intercambio catiónico de moderadamente bajo (12.12 meq/100 g); nivel alto para P-Bray (50.01 ppm); y, valor moderadamente bajo del porcentaje de arcilla (16.53%), (Castellanos *et al.* 2000). Respecto a la variabilidad, destacan los coeficientes de variación: del P-Bray (37.38%); porcentaje de materia orgánica (35.76%); y, de la arcilla (23.18%).

Cuadro 6. Estadística descriptiva de las 78 muestras de la parcela Zapopan.

Parámetro	pH	% MO	CIC	P-Bray	% R
Coficiente de asimetría	0.50	-0.37	-0.67	0.50	-0.01
Curtosis	-0.654	-0.556	1.429	-0.368	1.197
Media	5.17	1.74	12.12	50.01	16.53
Nivel de confianza (95.0%)	0.13	0.14	0.32	4.22	0.86
Error típico	0.07	0.07	0.16	2.12	0.43
Mínimo	4.12	0.33	6.73	24.00	4.08
Cuartil 1	4.72	1.25	11.22	33.00	14.08
Mediana	5.07	1.81	12.04	50.00	16.36
Cuartil 3	5.59	2.21	13.25	60.00	18.72
Máximo	6.44	3.04	15.10	102.00	25.72
Moda	4.54	2.21	12.04	60.00	19.72
Rango	2.32	2.71	8.37	78	21.64
Desviación estándar	0.59	0.62	1.42	18.70	3.83
Varianza de la muestra	0.35	0.39	2.02	349.51	14.67
CV	11.50	35.76	11.73	37.38	23.18

\* MO indica el porcentaje de materia orgánica y CIC la capacidad de intercambio catiónico.

Tomando como referencia los valores promedio es posible que se lleguen a tomar decisiones tales como la aplicación de cal en las parcelas de Villa Corona y Zapopan, igualmente pudiera recomendarse una dosis de fertilizante fosfórico considerable para las parcelas Atequiza y Villa Corona. Sin embargo al considerar las medidas de

dispersión, tanto del pH como del contenido de P-Bray, este tipo de decisiones no serían las más adecuadas para toda la superficie de las parcelas señaladas.

A partir de los cuadros de estadística descriptiva es posible interpretar los rangos (diferencia entre valor máximo y mínimo) correspondientes a las diferentes variables; esto indica la amplia diferencia que puede encontrarse dentro de una parcela agrícola. Lo anterior representa un alto riesgo para el muestreo basado en una sola muestra compuesta la cual puede conducir a resultados cercanos a los extremos del rango. La dispersión de estos datos se puede apreciar en los diagramas de caja y bigotes que se presentan en las Figuras A1 a la A5 del Anexo 1, en el Apéndice.

A partir de los resultados presentados en los cuadros 4, 5 y 6, y con la finalidad de que los datos sirvan de base para procesos de inferencia más avanzados, se determinaron asimetría y curtosis. Los resultados de estas medidas indican que las variables estudiadas presentan distribuciones insesgadas y que esto, complementado con la prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov, no hace necesario realizar transformaciones sobre las variables estudiadas para continuar con los procesos de inferencia (Zar, 1999), y de geoestadística (Isaaks y Srivastava, 1989).

Los resultados de esta prueba se presentan en el Cuadro 7. La prueba de normalidad se realizó para las cinco variables en todas las parcelas con  $\alpha=0.05$ , todas las variables estudiadas resultaron con distribución normal.

Cuadro 7. Resultados de la prueba de Normalidad para las variables estudiadas.

Valores de $p$ en la prueba de Kolmogorov-Smirnov					
Variable	pH	M.O.	CIC	P-Bray	Arcilla
Parcela					
Atequiza	>0.150	0.118	>0.150	>0.150	>0.150
Villa Corona	>0.150	>0.150	>0.150	>0.150	0.138
Zapopan	0.068	0.112	>0.150	0.089	>0.150

\* Valor  $p$  mayor a 0.05, la distribución es Normal

## 5.2 Análisis de Correlación.

En el Cuadro 8 se presenta la matriz de correlación para Atequiza en la cual destacan las relaciones materia orgánica con capacidad de intercambio catiónico, P-Bray y arcilla; igualmente las relaciones entre P-Bray y pH; y arcilla con capacidad de intercambio catiónico. Estas correlaciones resultan significativas ( $p < 0.05$ ).

Cuadro 8. Matriz de correlación de las variables de estudio en la parcela Atequiza.

	Materia orgánica	pH	CIC*	P-Bray
pH	0.007 (0.943) <sup>1</sup>			
CIC*	0.702 (0.000)	0.193 (0.057)		
P-Bray	0.309 (0.002)	-0.351 (0.000)	0.130 (0.201)	
Arcilla	0.349 (0.000)	-0.024 (0.817)	0.560 (0.000)	0.084 (0.410)

<sup>1</sup> El número dentro de paréntesis corresponde al valor de significancia (valor  $p$ ); \* CIC es capacidad de intercambio catiónico.

En el Cuadro 9 se presenta la matriz de correlación para Villa Corona en la cual destacan las relaciones arcilla con pH, capacidad de intercambio catiónico y P-Bray; igualmente las relaciones entre capacidad de intercambio catiónico con materia orgánica y P-Bray; y pH con P-Bray. Estas correlaciones resultan significativas ( $p < 0.05$ ).

Cuadro 9. Matriz de correlación de las variables de estudio en la parcela Villa Corona.

	Materia orgánica	pH	CIC*	P-Bray
pH	-0.110 (0.448) <sup>1</sup>			
CIC*	0.715 (0.000)	-0.132 (0.359)		
P-Bray	0.268 (0.060)	-0.543 (0.000)	0.294 (0.038)	
Arcilla	0.153 (0.289)	-0.342 (0.015)	0.493 (0.000)	0.519 (0.000)

<sup>1</sup> El número dentro de paréntesis corresponde al valor de significancia (valor  $p$ ); \* CIC es capacidad de intercambio catiónico.

En el Cuadro 10 se presenta la matriz de correlación para Zapopan en la cual destacan las relaciones arcilla con pH, capacidad de intercambio catiónico y P-Bray; igualmente las relaciones entre P-Bray con materia orgánica y pH; y, materia orgánica con pH. Estas correlaciones resultan significativas ( $p < 0.05$ ).

Cuadro 10. Matriz de correlación de las variables de estudio en la parcela Zapopan.

	Materia orgánica	pH	CIC*	P-Bray
pH	0.360 (0.001) <sup>1</sup>			
CIC*	0.216 (0.057)	0.205 (0.071)		
P-Bray	0.282 (0.012)	0.494 (0.000)	0.139 (0.226)	
Arcilla	-0.102 (0.374)	-0.529 (0.000)	0.268 (0.018)	-0.390 (0.000)

<sup>1</sup> El número dentro de paréntesis corresponde al valor de significancia (valor  $p$ ); \* CIC es capacidad de intercambio catiónico.

### 5.3 Análisis de Dependencia Espacial.

En el análisis de dependencia espacial se partió del supuesto de que las variables tienen un comportamiento isotrópico. Los parámetros geoestadísticos resultantes de los semivariogramas para la parcela Atequiza se muestran en el Cuadro 11.

Los semivariogramas se ajustan a un modelo que los represente adecuadamente. Para las variables pH y capacidad de intercambio catiónico se seleccionó el modelo gaussiano; para los porcentajes de materia orgánica y arcilla fue seleccionado el modelo esférico; y finalmente, la variable P-Bray solamente pudo ajustarse al modelo exponencial, sin embargo este modelo no estima adecuadamente el comportamiento del semivariograma presentando un valor de  $r^2 < 0.500$ . Las gráficas correspondientes a estos semivariogramas se presentan en las Figuras A11 a A15 del Anexo 3 en el Apéndice.

Cuadro 11. Parámetros del Semivariograma para las variables de estudio de la parcela Atequiza.

Variable	Modelo	$C_0$	$C_0 + C$	$A_0$ Rango	$C_0/(C_0+C)$ %	Suma de Cuadrados de Residuales	$r^2$
pH	Gaussiano	0.01356	0.03872	273.49	35.0	3.482 E-06	0.992
% MO*	Esférico	0.0617	0.2254	372.00	27.4	0.0028	0.812
CIC*	Gaussiano	6.15	32.29	349.35	19.0	15.5	0.951
P-Bray	Exponencial	3.52	30.53	44.10	11.5	40.7	0.470
% Arcilla	Esférico	4.51	19.58	42.60	23.0	17.0	0.547

\* MO indica el porcentaje de materia orgánica y CIC la capacidad de intercambio catiónico.

En lo referente al parámetro rango, que indica la distancia en la cual se presenta dependencia espacial de las variables, el pH, porcentaje de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico de esta parcela, muestran los rangos de dependencia espacial más altos, con valores de 273.49, 372.00 y 349.35 m respectivamente, no así las variables P-Bray y porcentaje de arcilla, con rangos de 44.10 y 42.60 m, respectivamente.

El efecto pepita relativo [ $C_0/(C_0+C)$  en %], resulta considerable para las variables pH, porcentaje de materia orgánica y porcentaje de arcilla.

Los parámetros de dependencia espacial para la parcela Villa Corona se presentan en el Cuadro 12.

Los semivariogramas para las variables P-Bray y porcentaje de arcilla se ajustan a un modelo esférico. Las variables pH, porcentaje de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico presentaron semivariogramas que no fue posible ajustar a

ningún modelo teórico. Las gráficas correspondientes a estos semivariogramas se presentan en las Figuras A16 a A20 del Anexo 3 en el Apéndice.

Cuadro 12. Parámetros del semivariograma para las variables de estudio de la parcela Villa Corona.

Variable	Modelo	$C_0$	$C_0 + C$	$A_0$	$C_0/(C_0+C)$ %	Suma de Cuadrados de Residuales	$r^2$
pH	Esférico	0.0003	0.2706	60.10	0.1	0.0499	0.278
% MO*	Exponencial	0.0130	0.264	42.30	4.9	0.0372	0.094
CIC*	Exponencial	0.42	6.119	45.60	6.9	10.6	0.188
P-Bray	Esférico	9.0	80.7	100.10	11.2	2110	0.584
% Arcilla	Esférico	2.62	10.99	77.30	23.8	5.67	0.834

\* MO indica el porcentaje de materia orgánica y CIC la capacidad de intercambio catiónico.

En lo referente al parámetro rango, para el P-Bray y porcentaje de arcilla fueron de 100.1 y 77.3 m respectivamente.

El efecto pepita relativo [ $C_0/(C_0+C)$  en %], se considera bajo para las variables P-Bray y porcentaje de arcilla.

Los parámetros de los semivariogramas de la parcela Zapopan se presentan en el Cuadro 13.

Los semivariogramas se ajustan a un modelo que los represente adecuadamente. Para las variables pH, P-Bray y porcentaje de arcilla se seleccionó el modelo esférico; para el porcentaje de materia orgánica fue seleccionado el modelo

exponencial; y finalmente, la variable capacidad de intercambio catiónico se ajustó al modelo gaussiano. Para todas las variables se considera que el ajuste fue adecuado, con valores de  $r^2 > 0.500$ . Las gráficas correspondientes a estos semivariogramas se presentan en las Figuras A21 a A25 del Anexo 3 en el Apéndice.

Cuadro 13. Parámetros del semivariograma para las variables de estudio de la parcela Zapopan.

Variable	Modelo	$C_0$	$C_0 + C$	$A_0$	$C_0/(C_0+C)$ %	Suma de Cuadrados de Residuales	$r^2$
pH	Esférico	0.1239	0.4208	148.2	29.4	0.0484	0.611
% MO	Exponencial	0.0860	0.4520	132.0	19.0	0.0074	0.888
CIC	Gaussiano	1.650	5.310	601.2	31.1	0.234	0.887
P-Bray	Esférico	122.9	388.5	119.2	31.6	19671	0.723
% Arcilla	Esférico	4.77	16.79	120.3	28.4	16.4	0.867

\* MO indica el porcentaje de materia orgánica y CIC la capacidad de intercambio catiónico.

En lo referente al parámetro rango, que indica la distancia en la cual se presenta dependencia espacial de las variables, Los valores oscilan entre 100 y 150 m para las variables pH, porcentaje de materia orgánica, P-Bray y porcentaje de arcilla. Para la capacidad de intercambio catiónico el rango alcanzó 601.2 m.

El efecto pepita relativo [ $C_0/(C_0+C)$  en %], se considera medio para todas las variables de esta parcela, tomando valores entre 19 a 31.6%.

5.3.1 Prueba de validación cruzada. Para comprobar que los modelos seleccionados presenten un buen ajuste, se procedió a la validación cruzada. Se

Cuadro 14. Resultados de la prueba de validación cruzada para las variables estudiadas.

Parcela	Variable	Coefficiente Regresión $\beta_1$	$R^2$	Ordenada al Origen $\beta_0$	Error Estándar de la Regresión	Media $\pm$ Error de predicción
Atequiza	pH	0.937	0.264	0.34	0.160	5.53 $\pm$ 0.129
	% MO*	1.161	0.510	-0.43	0.116	2.64 $\pm$ 0.253
	CIC*	1.097	0.500	-4.17	0.112	42.98 $\pm$ 2.532
	% Arcilla	0.666	0.120	13.29	0.184	40.13 $\pm$ 4.135
Villa Corona	P-Bray	0.864	0.414	3.24	0.149	23.75 $\pm$ 6.457
	% Arcilla	0.821	0.272	2.56	0.194	14.22 $\pm$ 2.725
Zapopan	pH	1.019	0.418	-0.10	0.138	5.17 $\pm$ 0.454
	% MO*	0.970	0.346	0.05	0.153	1.74 $\pm$ 0.503
	CIC*	0.942	0.080	0.74	0.367	12.12 $\pm$ 1.364
	P-Bray	0.941	0.359	2.92	0.144	50.01 $\pm$ 14.965
	% Arcilla	0.996	0.412	0.06	0.136	16.53 $\pm$ 2.936

\* MO indica el porcentaje de materia orgánica y CIC la capacidad de intercambio catiónico.

presentan los resultados de esta prueba en el Cuadro 14 y sus correspondientes gráficos en las Figuras A26 a A36 del Anexo 4 en el Apéndice. Un modelo que predice de manera correcta los valores en los sitios no muestreados, tendrá un coeficiente de regresión ( $\beta_1$ ) de 1.0, una  $r^2$  de 1.0 y la ordenada al origen ( $\beta_0$ ) cercana a 0.

Con base en los resultados de la validación cruzada, las variables que fueron seleccionadas para los procesos de interpolación debieron presentar valores de  $r^2$  mayores a 0.400, coeficientes de regresión ( $\beta_1$ ) cercanos a la unidad (0.864 hasta

1.161) y cuyo error de predicción no fuera mayor al 10% de su valor medio. Para la parcela Villa Corona no fue posible identificar ninguna variable con todas estas características, por lo que se seleccionó P-Bray, aún teniendo un porcentaje de error de predicción de 27%.

Las variables seleccionadas para la interpolación fueron: en la parcela Atequiza porcentaje de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico; en la parcela Villa Corona P-Bray; y, en la parcela Zapopan pH y porcentaje de arcilla.

#### 5.4 Interpolación.

Se elaboraron los mapas de interpolación sólo para aquellas variables con la característica de estructura bien definida y señaladas en el apartado de validación cruzada. Los rangos que se utilizaron para agrupar los valores interpolados son acordes a la interpretación agronómica de las variables en estudio (Colegio de Postgraduados, 1991 y Castellanos *et al.*, 2000).

Las variables estudiadas se ajustaron a una distribución normal, por lo que no se tiene inconveniente para la aplicación de las técnicas paramétricas de inferencia estadística. Por otra parte no fue necesario hacer transformaciones de variables para su análisis. Lo anterior concuerda con los resultados obtenidos por Vieira *et al.* (2002), quienes consignan normalidad para las variables porcentaje de materia orgánica, pH y capacidad de intercambio catiónico.

La variabilidad medida por el coeficiente de variación, indica que la variable pH presentó el valor de variación más bajo en las tres parcelas (2.71%, 11.37% y 11.50%, para Atequiza, Villa Corona y Zapopan, respectivamente), que concuerda con lo consignado por Brejda *et al.* (2000) que reportan un rango desde 8 a 28% y

Melchiori *et al.* (2000) quienes consignan el 3%. Aunque el valor del coeficiente de variación del pH en la parcela Zapopan se considera bajo, el pH presentó un rango de 2.32 unidades, es necesario considerar que esta propiedad se mide en escala logarítmica.

En cambio la variable P-Bray presentó los valores más altos de variación para las tres parcelas (32.22%, 35.50% y 37.38%; para Atequiza, Villa Corona y Zapopan, respectivamente), esto ha sido frecuente también en otros estudios. Brejda *et al.* (2000) informan coeficientes de variación tan altos como 148%; Hernández *et al.* (2003) establecen para P-Bray valores del coeficiente de variación de 47% y 229%, siendo los más altos de las variables de suelo reportadas en este trabajo. Así mismo, los rangos resultantes para esta variable en las tres parcelas fueron de 34.5, 43 y 78 ppm respectivamente, que son valores considerables al momento de clasificar el suelo para fertilidad ya que estos rangos de concentraciones pueden corresponder a diferentes categorías para el fósforo aprovechable en una parcela relativamente pequeña y considerada homogénea en un procedimiento de muestreo ordinario, tal como lo consignan Castellanos *et al.* (2000), que clasifican como muy bajo, niveles de 0 a 4 ppm; bajo, niveles de 5 a 10 ppm; moderadamente bajo, niveles de 11 a 20 ppm; medio, niveles de 21 a 30 ppm; moderadamente alto, niveles de 31 a 40; alto; niveles de 41 a 60; y muy alto, niveles mayores a 60 ppm.

Por otro lado, el porcentaje de materia orgánica en la parcela de Zapopan también presentó un valor alto de Coeficiente de Variación, a diferencia de esta variable en las otras dos parcelas (35.76% para Zapopan, 13.7% para Atequiza y 15.54% para Villa Corona). Gaston *et al.* (2001), consignan valores del coeficiente de variación de 10.6 y 20.6%, en cambio Hernández *et al.* (2003), refieren valores de 19 y 60%.

Respecto al porcentaje de arcilla para las parcelas Atequiza, Villa Corona y Zapopan se presentan coeficientes de variación de 10.98, 22.50 y 23.18% respectivamente,

los cuales son menores a los obtenidos por Brejda *et al.* (2000) de 35 a 43%, y mucho más bajos que los reportados por Gaston *et al.* (2001) de 52 y 61%.

Por otra parte la capacidad de intercambio catiónico para las parcelas en estudio presentó coeficientes de variación de 8.33, 13.96 y 11.73% para Atequiza, Villa Corona y Zapopan respectivamente, lo cual concuerda con lo consignado por Melchiori *et al.* (2000) de 12%; estos valores son sensiblemente menores que los reportados por Brejda *et al.* (2000) de 28% a 43%.

En el Cuadro 15 se presenta una clasificación de la variabilidad, de acuerdo a lo establecido por Wilding mencionado por Mulla y McBratney (2000).

De acuerdo a lo presentado en el Cuadro 15 es adecuado referirse a las parcelas en estudio como razonablemente homogéneas. Con excepción de P-Bray en la parcela Zapopan, la variabilidad se puede clasificar de baja a moderada. Igualmente en las comparaciones de los coeficientes de variación los valores reportados en este estudio alcanzan niveles iguales o menores a los reportados en estudios semejantes.

Se considera la parcela de Atequiza como la más homogénea puesto que presenta rangos de variabilidad baja con excepción de P-Bray en el cual es moderada. En la parcela Zapopan se presentan rangos de variabilidad desde baja para pH y capacidad de intercambio catiónico; moderada para porcentajes de materia orgánica y arcilla; y alta para P-Bray. Esto representa dificultades para seleccionar el número de sitios en un procedimiento de muestreo tradicional, así como en el muestreo intensivo, puesto que P-Bray requiere un mayor número de muestras que las otras variables.

Cuadro 15. Categorización de las variables de estudio de acuerdo al coeficiente de variación.

Variable de estudio	Magnitud de variabilidad basado en coeficiente de variación		
	Parcela Atequiza	Parcela Villa Corona	Parcela Zapopan
pH	Baja	Baja	Baja
% de materia orgánica	Baja	Baja	Moderada
Capacidad de intercambio catiónico	Baja	Baja	Baja
P-Bray	Moderada	Moderada	Alta
% arcilla	Baja	Moderada	Moderada

Las correlaciones entre variables se presentan en los Cuadros 8, 9 y 10 para las parcelas Atequiza, Villa Corona y Zapopan, respectivamente. Destaca la relación entre capacidad de intercambio catiónico y porcentaje de arcilla, la cual fue significativa ( $p < 0.05$ ) en las tres parcelas; este hecho está ampliamente fundamentado en la literatura (Brady y Weil, 1996; Havlin *et al.*, 1999; Castellanos *et al.*, 2000). Igualmente la capacidad de intercambio catiónico presentó correlación altamente significativa ( $p < 0.01$ ) con porcentaje de materia orgánica en las parcelas Atequiza y Villa Corona, lo cual es congruente con lo informado por Brouder *et al.* (2001). Finalmente la capacidad de intercambio catiónico tiene correlación significativa ( $p < 0.05$ ) con P-Bray en la parcela Villa Corona, lo cual puede ocurrir en algunas condiciones que son señaladas por Havlin *et al.* (1999); en Brouder *et al.* (2001) no se presenta correlación entre capacidad de intercambio catiónico y P-Bray, lo cual también se presentó en este estudio para las parcelas Atequiza y Zapopan.

La relación existente entre las variables P-Bray y pH es altamente significativa ( $p < 0.01$ ) para las tres parcelas. Para Atequiza y Villa Corona la correlación es negativa, lo cual puede deberse al margen estrecho entre valores de pH y al amplio rango en el que se encuentra el contenido de P-Bray. En la parcela Zapopan la correlación fue positiva, este efecto de la acidez sobre la disponibilidad del P-Bray está fundamentado (Brady y Weil, 1996; Havlin *et al.*, 1999) y está reportada en el trabajo de Brouder *et al.* (2001). Igualmente el P-Bray se correlacionó significativamente con el porcentaje de materia orgánica ( $p < 0.05$ ) en las parcelas Atequiza y Zapopan, de manera semejante a lo consignado por Brouder *et al.* (2001); en cambio para Villa Corona no se presentó correlación significativa. En la parcela Atequiza se presentó una correlación altamente significativa entre porcentaje de materia orgánica y porcentaje de arcilla ( $p < 0.01$ ); lo cual no ocurrió en Villa Corona y Zapopan. Paz *et al.* (1996) tampoco encontraron correlación entre estas dos variables.

#### 5.5 Selección de modelos y variables.

El modelo teórico de semivariograma con mejor ajuste se seleccionó de acuerdo al menor valor de Suma de Cuadrados de los Residuales (RSS) y  $r^2$ , coeficiente de determinación, (Zar, 1999), mediante el software GS+ v 7.0 (Gamma, 2004), el cual selecciona entre varios modelos teóricos, indicando los valores de suma de cuadrados de los residuales y  $r^2$ .

Los modelos de mejor ajuste para las variables estudiadas resultaron ser el gaussiano, el exponencial y el esférico, lo que concuerda con varios investigadores (Paz *et al.*, 1996; Melchiori *et al.*, 2000; Solie *et al.*, 1999; Cassel *et al.*, 2000; Brouder *et al.*, 2001; Gaston *et al.*, 2001; Needelman *et al.*, 2001; Kravchenko y Bullock, 2002; Liu y Lisheng, 2002; Vieira *et al.*, 2002; Hernández *et al.*, 2003). Sobresale el modelo esférico para porcentaje de arcilla, el cual fue el mejor para las tres parcelas; resultados semejantes reportan Gaston *et al.* (2001); y en general para otros porcentajes de partículas del suelo Paz *et al.* (1996). Para el resto de las

variables de este estudio no fue el mismo modelo el que se ajustó para todos los sitios, esto puede deberse a los diferentes tipos de suelos a los que pertenecen éstas.

Para las tres parcelas se formaron los conjuntos de pares de puntos a intervalos de distancia de 20.5 m (ligeramente mayor al tamaño de cuadrícula), y una tolerancia de amplitud de ángulo de  $25^{\circ}$ , según lo recomendado en la literatura. En el Anexo 3, las Figuras A16 a A20 muestran los semivariogramas para la parcela Villa Corona. El intervalo de distancia para cada conjunto de pares de puntos en esta parcela al igual que en las otras dos, fue de 20.5 m y un ángulo de tolerancia de  $22.5^{\circ}$ . En esta parcela el último conjunto de pares de puntos en base a la distancia, estuvo formada por sólo 27 pares de muestras, que como se indicó en la revisión de literatura, para que el resultado fuera confiable debía ser de por lo menos 30 pares en cada conjunto de pares de puntos, por lo que se redujo la distancia para la obtención del modelo a 180.70 m, eliminando de esta manera el último conjunto. Sobre esta cuestión en particular no se ofrecen detalles en las investigaciones revisadas para el desarrollo del presente estudio.

En los Cuadros 11, 12 y 13 se presentan los parámetros del semivariograma para las cinco variables de estudio en cada una de las parcelas. De acuerdo a la clasificación de dependencia espacial con base en el rango, según Mulla y McBratney (2000), para Atequiza, el pH, porcentaje de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico, quedan clasificadas como de rango largo; en cambio P-Bray y porcentaje de arcilla son de rango corto. En lo que respecta al rango para las variables de la parcela Villa Corona, se presentan de corto a moderado, siendo los más largos aquéllos de las variables con mejor ajuste al modelo ya que para P-Bray fue de 100.1m y para porcentaje de arcilla de 77.3m, estos resultados son congruentes con los reportados por Vieira *et al.* (2002). En la parcela Zapopan se presentaron rangos mayores a 100 m, siendo el más alto 601m para la variable capacidad de intercambio catiónico y el más bajo 119.2m para P-Bray. Vieira *et al.* (2002), consignan rangos de

50m a 90m para porcentaje de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico en una cuadrícula de las mismas dimensiones de este estudio (20 x 20 m); y Hernández *et al.* (2003), en cuadrículas de 5x5 m registran rangos de 12 m a 17 m para pH y porcentaje de materia orgánica.

En lo referente a la proporción de variabilidad no relacionada a la dependencia espacial ( $C_0/C_0+C$ ), es decir efecto pepita relativo, se encontró que para la parcela Villa Corona, sólo la variable porcentaje de arcilla presentó un valor alto (23.8%), el cual está cerca de lo reportado por Hernández *et al.* (2003) y que puede explicarse como variabilidad a menor escala de la aquí desarrollada; es decir, que una cuadrícula con menores dimensiones pudiera haber producido menor efecto pepita relativo. Un comportamiento similar se observó en las parcelas Atequiza y Zapopan para esta misma variable. Hernández *et al.* (2003), en parcelas de menores dimensiones (5 x 5 m), refieren valores de efecto pepita relativo de 15 y 23% para porcentaje de arcilla. Así mismo, Hernández *et al.* (2003), reportan valores de efecto pepita relativo de 19 y 35 % para pH, semejante a lo que ocurre en las parcelas Atequiza y Zapopan, en tanto que para la parcela Villa Corona este efecto fue de 0.1%.

El porcentaje de materia orgánica en la parcela Villa Corona presenta un efecto pepita relativo de 4.9%, el cual es más bajo que el 8% reportado por Hernández *et al.* (2003); y el 13.2% consignado por Paz *et al.* (1996). Para las parcelas Atequiza y Zapopan este efecto fue más alto que los referidos anteriormente, 19.0% y 27.4%, respectivamente; aunque todos estos son más bajos que el 66% reportado por Melchiori *et al.* (2000).

El efecto pepita relativo en la variable capacidad de intercambio catiónico presentó un valor de 6.9% en la parcela Villa Corona, el cual está muy por debajo de los obtenidos en las parcelas Atequiza y Zapopan, 19% y 31.1%, respectivamente; en

otros trabajos se consignan valores de 18% por Paz *et al.* (1996) y tan altos como el 92% por Melchiori *et al.* (2000).

Para la variable P-Bray los valores son semejantes para las parcelas Atequiza y Villa Corona, 11.5% y 11.2% respectivamente, en tanto que para Zapopan se presentó el 31.6%; en el estudio realizado por Paz *et al.* (1996) se reporta un valor tan bajo como el 2%; en tanto que Melchiori *et al.* (2000) registraron valores tan altos como 56%.

De acuerdo a los resultados obtenidos de las tres parcelas, en algunos casos se presentan variables cuyos modelos arrojaron bajo coeficiente de determinación, lo cual significa que estas variables no pudieron ser modeladas adecuadamente mediante esta técnica; por tal motivo, para continuar con el proceso de validación cruzada, se optó por seleccionar sólo aquellos con  $r^2$  mayor a 0.5, siendo las variables seleccionadas: capacidad de intercambio catiónico, porcentaje de materia orgánica, pH y porcentaje de arcilla en la parcela Atequiza; P-Bray y porcentaje de arcilla en la parcela Villa Corona; y, las cinco variables en la parcela Zapopan.

De acuerdo con Kravchenko (2003), es muy importante definir una estructura espacial de la variable que será sometida al proceso de interpolación. Los métodos de interpolación son más confiables para variables con estructuras bien definidas. El método Kriging considerado como el mejor estimador lineal insesgado, se utilizó para obtener los mapas de interpolación, sólo para aquellas variables con estructura bien definida: efecto pepita relativo  $C_0/(C_0+C)$ , menor a 50%; un modelo con buen ajuste ( $p < 0.05$ ); y, una  $r^2$  en la validación cruzada mayor a 0.400. La validación cruzada también es recomendada por Isaaks y Srivastava (1989), y por Armstrong (1998). Con estas restricciones se redujo el número de mapas de interpolación a las variables siguientes: porcentaje de materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico para la parcela Atequiza; P-Bray para la parcela Villa Corona; y, el pH y porcentaje de arcilla para la parcela Zapopan. Needelman *et al.* (2001), en un estudio

sobre la modelación de la variabilidad espacial del P-Bray dentro de una parcela, aplicaron una prueba de validación para la selección de modelos.

5.6 Formación de estratos con los resultados de la interpolación y los valores observados.

Como resultado de la interpolación se tienen los mapas que se presentan en las Figuras 8 a 12. Los estratos en los que se agruparon los valores corresponden a niveles aceptados que faciliten su interpretación agronómica (Colegio de Postgraduados, 1991 y Castellanos *et al.*, 2000).

En la Figura 8 se presentó el mapa de interpolación para el porcentaje de materia orgánica en la parcela Atequiza, en el cual predominan dos áreas consideradas: media en las zonas Norte y Centro-Este; y, moderadamente alta en las zonas Oeste y Sur. Esta interpolación no presenta desviaciones fuertes respecto a los valores medidos los cuales se presentan en la Figura A6 del Anexo 2.

La estimación para la variable capacidad de intercambio catiónico mostrada en la Figura 9, presenta el predominio de una zona estratificada como muy alta, y en la parte Norte una zona con estrato alto. Esta representación es diferente en la parte Sur-Este respecto a la Figura A7 del Anexo 2; puede considerarse que la interpolación sobreestimó el valor en algunos puntos de esta zona.

Para la parcela Villa Corona, sólo fue posible elaborar el mapa de estimación para la variable P-Bray, el cual se muestra en la Figura 10. De acuerdo a lo observado se presenta un gradiente descendente a partir del Centro-Norte en las direcciones Sur-Oeste, Sur y Sur-Este. Incluye cinco niveles que van desde bajo (5-10 ppm) hasta alto (41-60 ppm). Aproximadamente el 90% de la superficie se puede clasificar con

contenidos moderadamente bajos y medios. El área que se encuentra en la parte Sur-Oeste, presenta los valores más altos ( $> 30$  ppm) de P-Bray; si se tomara una muestra en esta sección se corre un riesgo en el muestreo tradicional, dado que puede sobreestimarse el contenido de este elemento y en consecuencia hacer una fertilización deficiente. La gama de estratos de valores interpolados es similar a los valores presentados en la Figura A8 del Anexo 2. El rango de dependencia espacial obtenido mediante el estudio geoestadístico en esta parcela arrojó un valor de 113 m para el P-Bray, lo que confirma que es posible establecer dos zonas (Paz *et al.*, 1996) en la parcela en estudio para esta variable, lo que mejoraría la precisión del diagnóstico y la definición de un manejo diferencial.

Para la parcela Zapopan, los mapas interpolados para el pH y el porcentaje de arcilla, son los que se presentan en las Figuras 11 y 12, respectivamente. Se presenta un incremento del pH a partir de la zona noreste en todas las direcciones. En la mitad Sur de la parcela se presenta una franja a todo lo ancho de la misma con valores moderadamente ácidos; volviendo a disminuir en la zona Sur. En esta parcela un muestreo compuesto aleatorio podría dar como resultado el que corresponde al área con valores de pH menores a 4.6, o bien el que corresponde al área con valores entre 5.5 y 6.4. Si se considera que la escala del pH es logarítmica, la diferencia entre estos valores sería de un notable significado agronómico con respecto a la disponibilidad de nutrientes y otros importantes factores (Havlin *et al.*, 1999; Mortvedt, 2000). En esta parcela, la cantidad recomendable de un material encalante variaría grandemente, ya que la zona con mayor pH no requeriría de mejoradores, mientras que las áreas con pH menor a 4.6 tendrían que ser tratadas con cantidades que van de 2.0 a 2.5 ton/ha de  $\text{CaCO}_3$ . La comparación de los valores interpolados con los observados que se presentan en la Figura A9 del Anexo 2, muestran un ajuste razonable, por lo que la representación en el mapa de valores interpolados resulta útil para la interpretación de esta variable.

En la Figura 12 se muestra el mapa correspondiente al porcentaje de arcilla; aproximadamente el 90% de la parcela se clasifica como textura gruesa (0-20% de arcilla); solamente en los extremos noreste y Sureste el contenido de arcilla se ubica entre 20 y 35%. En este caso se tiene una correspondencia espacial notable entre los valores calculados y los observados que se presentan en la Figura A10 del Anexo 2. La relación que presentan estas dos variables (pH y porcentaje de arcilla) es inversa, ya que en las zonas con mayor contenido de arcilla se registraron los valores más bajos del pH, y por el contrario en las zonas con menor contenido de arcilla se presentan valores más altos del pH; este hecho había sido detectado en la matriz de correlación que se presenta en el Cuadro 11, que refleja una significativa correlación negativa entre ambas variables. Esta situación pudiera obedecer a que en los sitios de intercambio se tiene baja saturación de bases (Otero *et al.*, 1998; Havlin *et al.*, 1999; Bloom, 2000).

Los rangos de dependencia espacial resultantes para estas dos variables fueron de 148m y 120m para el pH y porcentaje de arcilla respectivamente, lo que indica que la parcela pudiera ser dividida en dos zonas en dirección Norte-Sur, para un muestreo y manejo correctos. Nuevamente, esta situación refleja la heterogeneidad de una sección de terreno que podría considerarse como área homogénea en un sistema tradicional de muestreo.

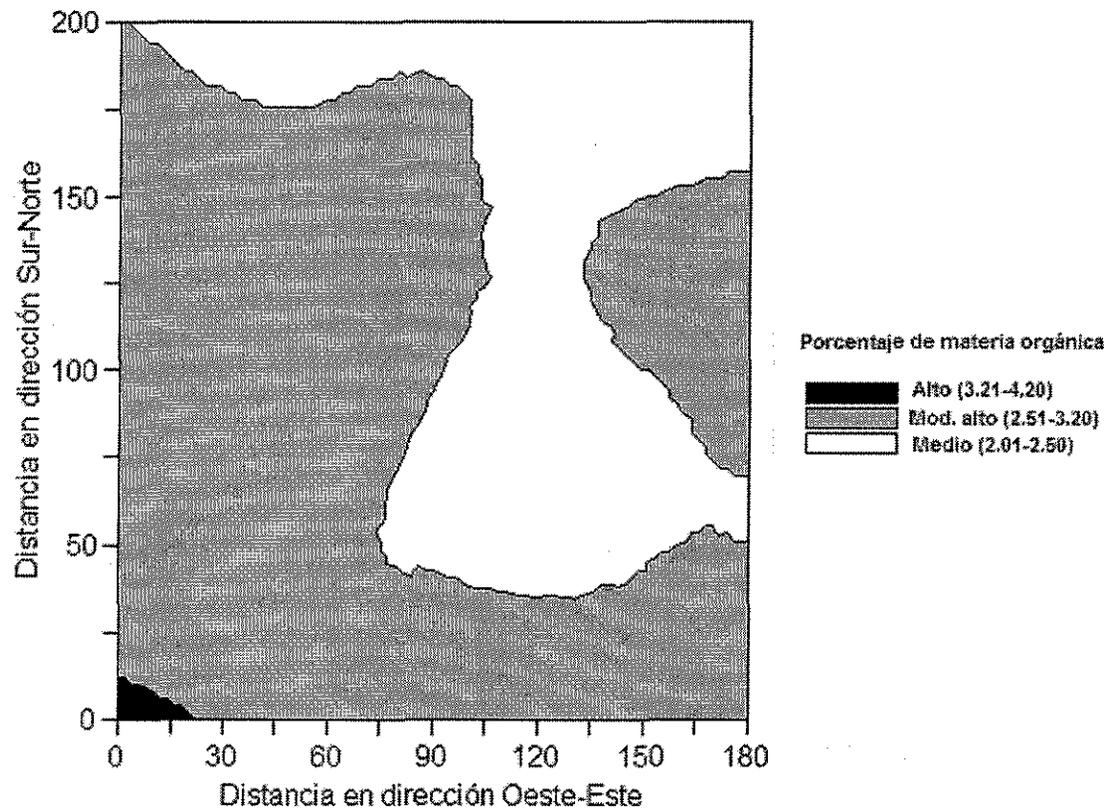


Figura 8. Mapa de interpolación por kriging de bloques para la variable porcentaje de materia orgánica en la parcela Atequiza.

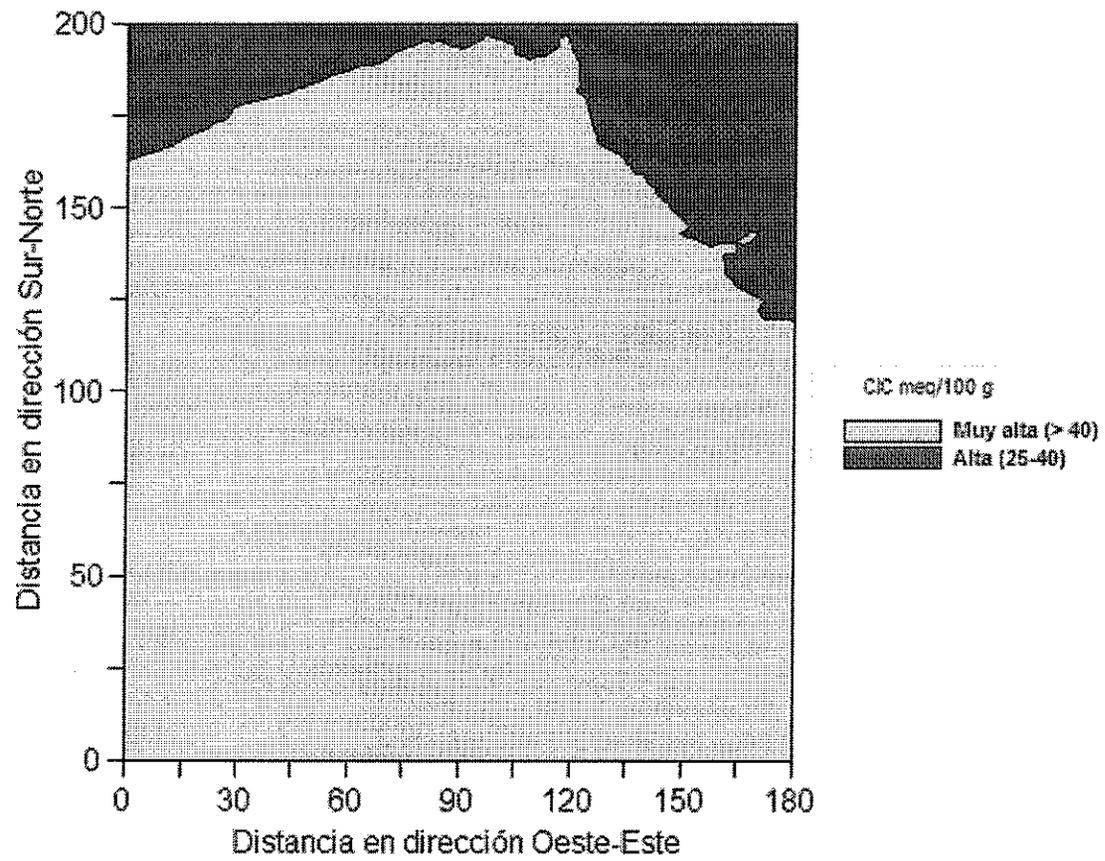


Figura 9. Mapa de interpolación por kriging de bloques para la variable capacidad de intercambio catiónico en meq/100 g de suelo en la parcela Atequiza.

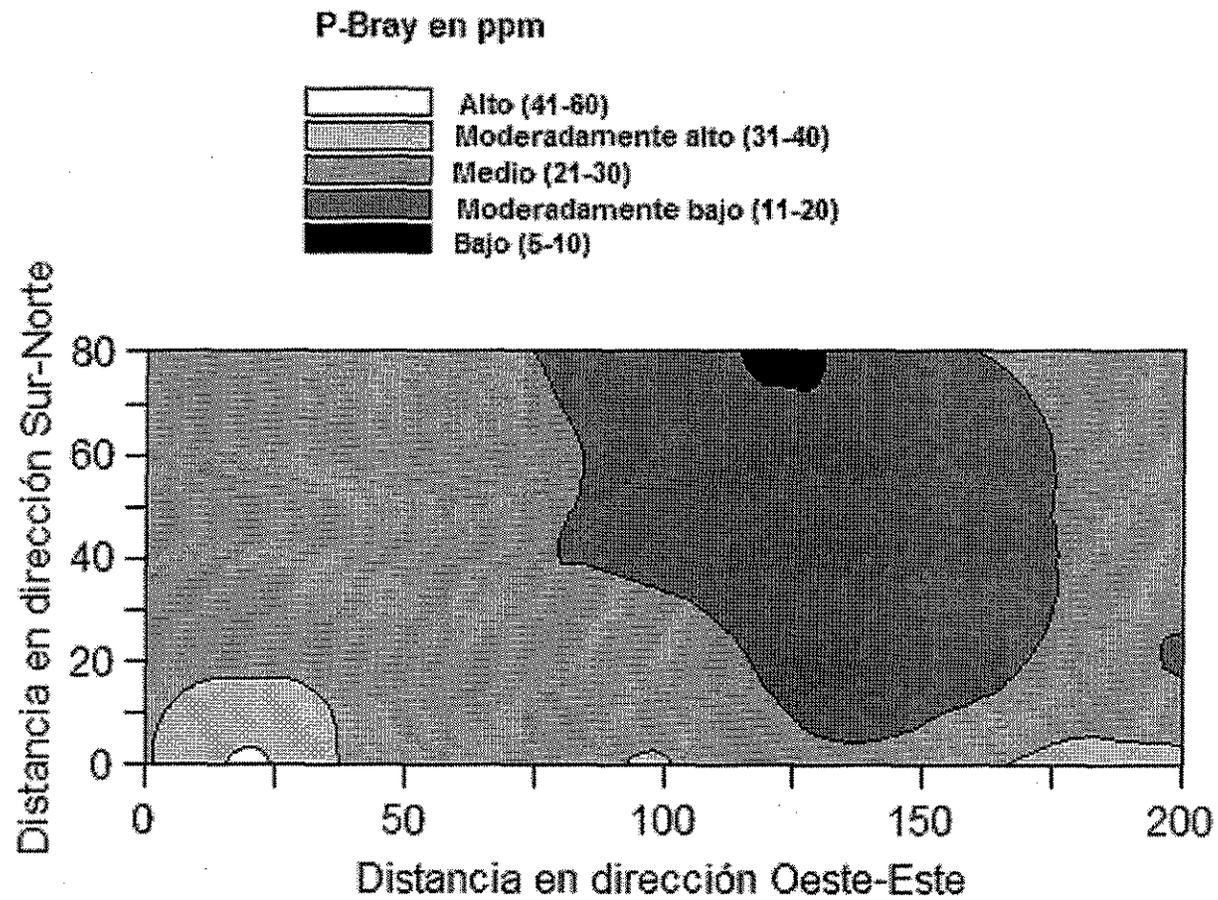


Figura 10. Mapa de interpolación por kriging de bloques para la variable P-Bray en la parcela Villa Corona.

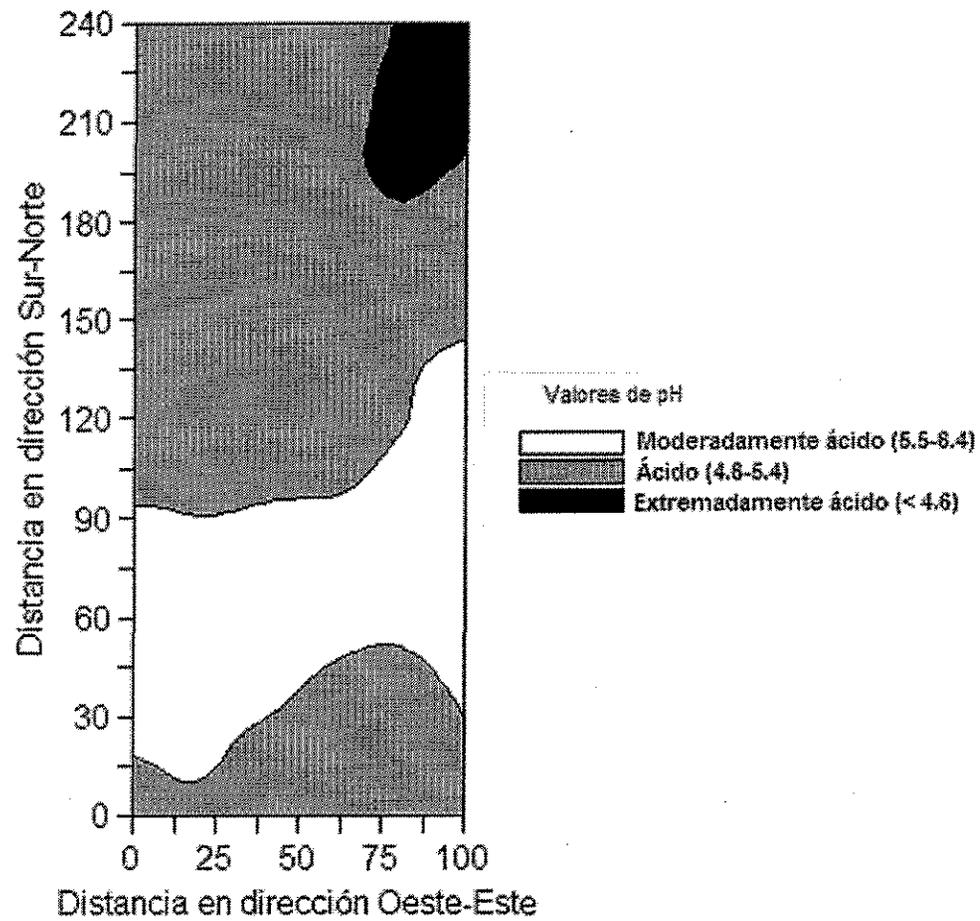


Figura 11. Mapa de interpolación por kriging de bloques para la variable pH en la parcela Zapopan.

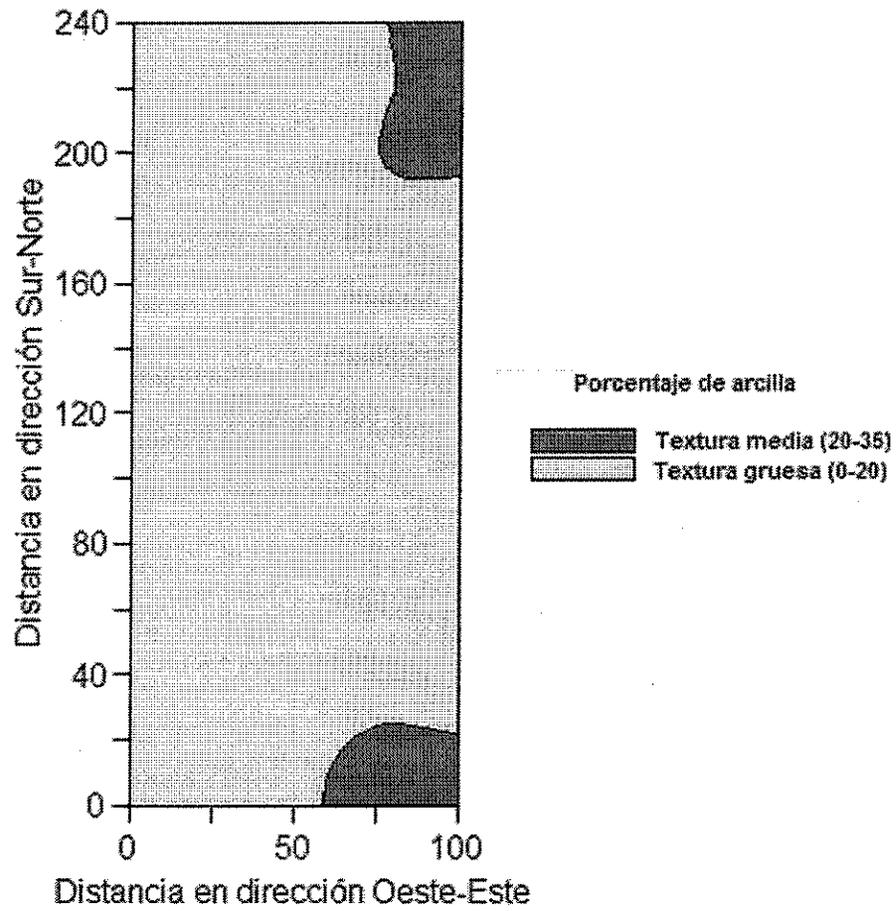


Figura 12. Mapa de interpolación por kriging de bloques para la variable porcentaje de arcilla en la parcela Zapopan.

## 6 CONCLUSIONES.

La información obtenida ubica a las variables en estudio como normalmente distribuidas y con la misma variación omnidireccional, es decir muestran comportamiento isotrópico.

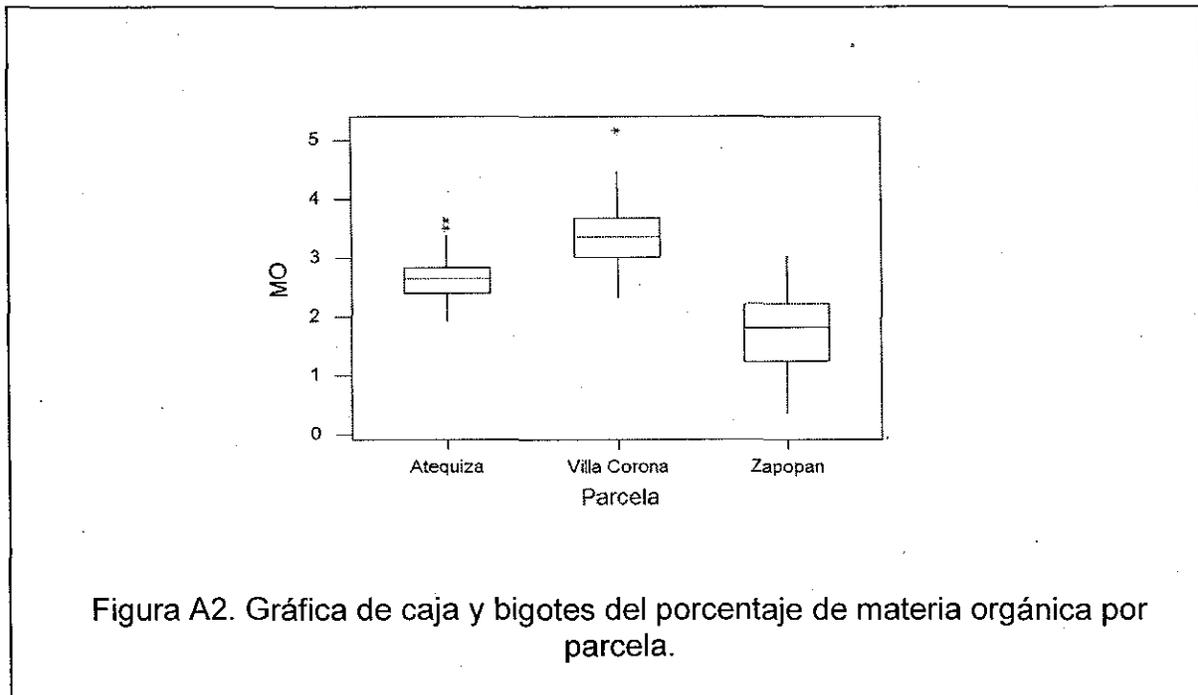
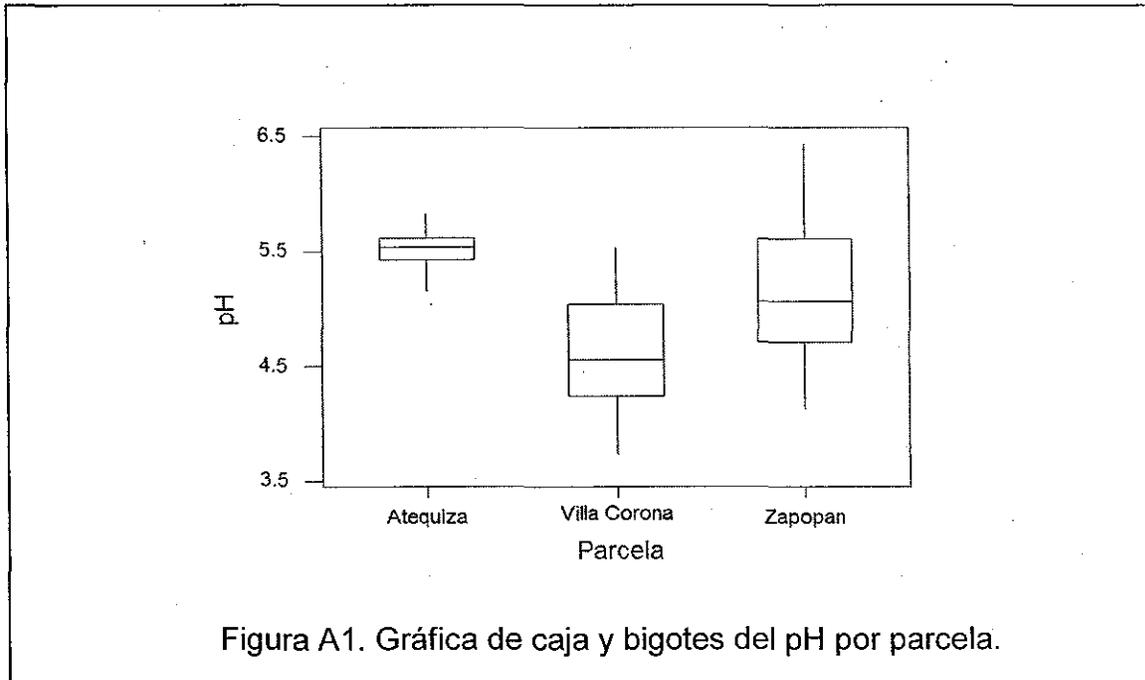
El estudio geoestadístico de la fertilidad del suelo permite detectar zonas diferenciadas aún en parcelas agrícolas de dimensiones pequeñas, en las cuales el cultivo expresaría respuesta diferente. Para este propósito es factible que los sitios de muestreo se ubiquen en cuadrícula con separación no mayor a 20m. En especial para las variables pH y Fósforo disponible es conveniente estudiarlas mediante una cuadrícula con espaciamiento menor a 20m.

Las variables estudiadas se comportaron de manera diferente para cada uno de los sitios, por lo que no es posible especificar *a priori* un espaciamiento determinado entre puntos muestreados, así como los modelos teóricos. Las variables del suelo aquí estudiadas, se ajustaron a los modelos esférico, exponencial y gaussiano.

Para el diagnóstico de la fertilidad del suelo, es importante considerar los rangos de dependencia espacial. En particular se considera que para algunas variables la representatividad de una muestra no es mayor a 42m, aunque en promedio puede llegar a los 100m.

## 7 APENDICE

### 7.1 Anexo 1. Gráficas de caja y bigotes por variable de estudio.



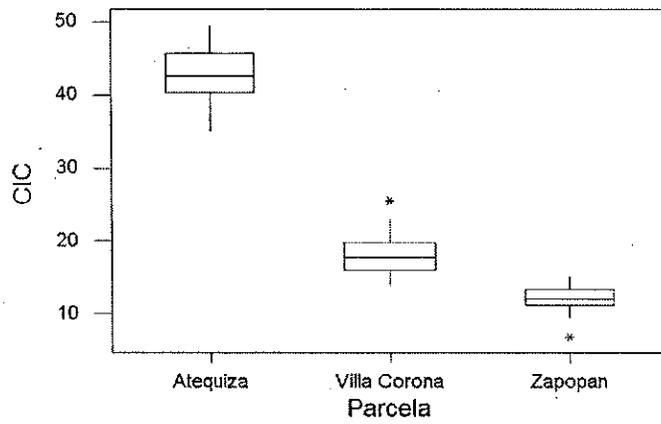


Figura A3. Gráfica de caja y bigotes de la capacidad de intercambio catiónico en meq/100 g por parcela.

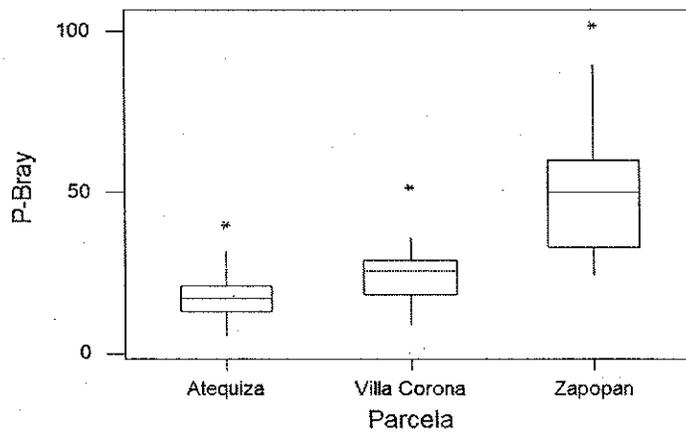


Figura A4. Gráfica de caja y bigotes del P-Bray por parcela.

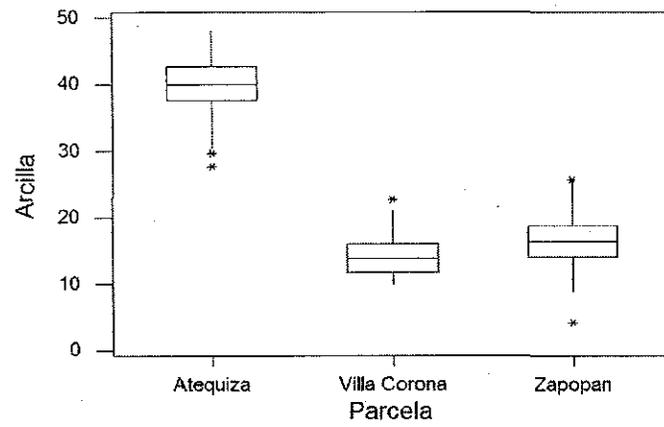
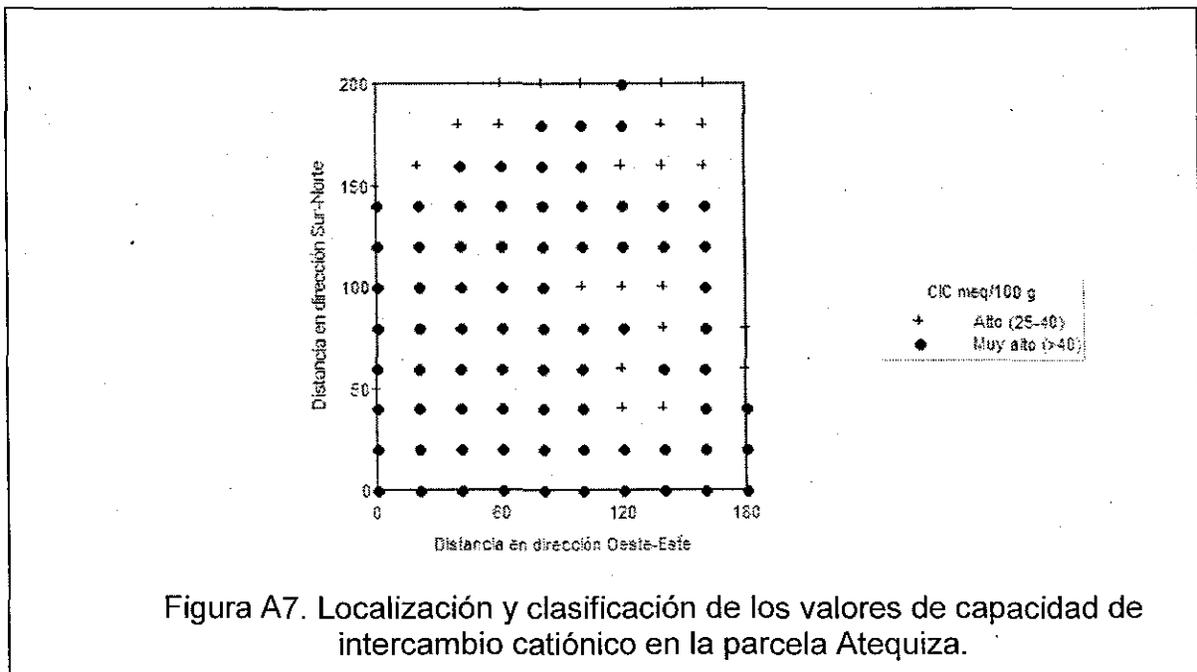
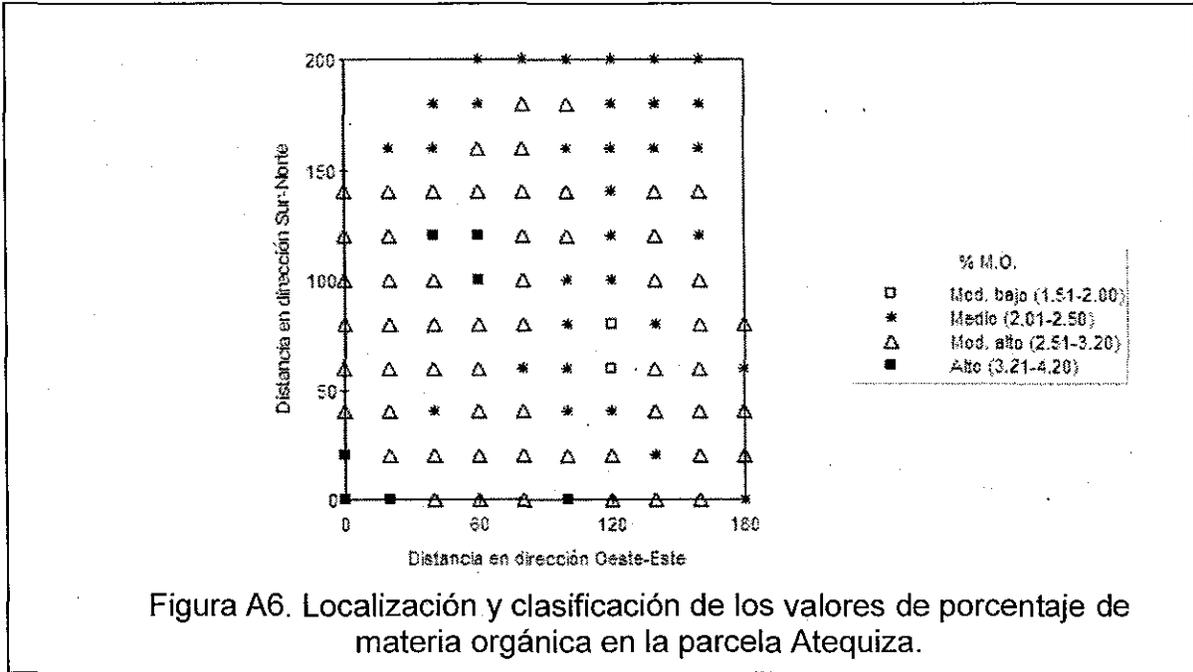


Figura A5. Gráfica de caja y bigotes del porcentaje de arcilla por parcela.

7.2 Anexo 2. Gráficas de localización de los valores observados para cada variable y su clasificación según criterios agronómicos (Castellanos *et al.* 2000 y Colegio de Postgraduados 1991).



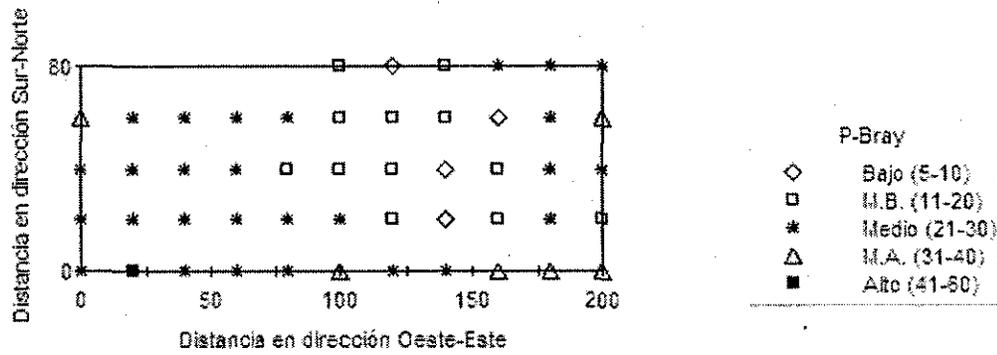


Figura A8. Localización y clasificación de los valores de P-Bray en la parcela Villa Corona.

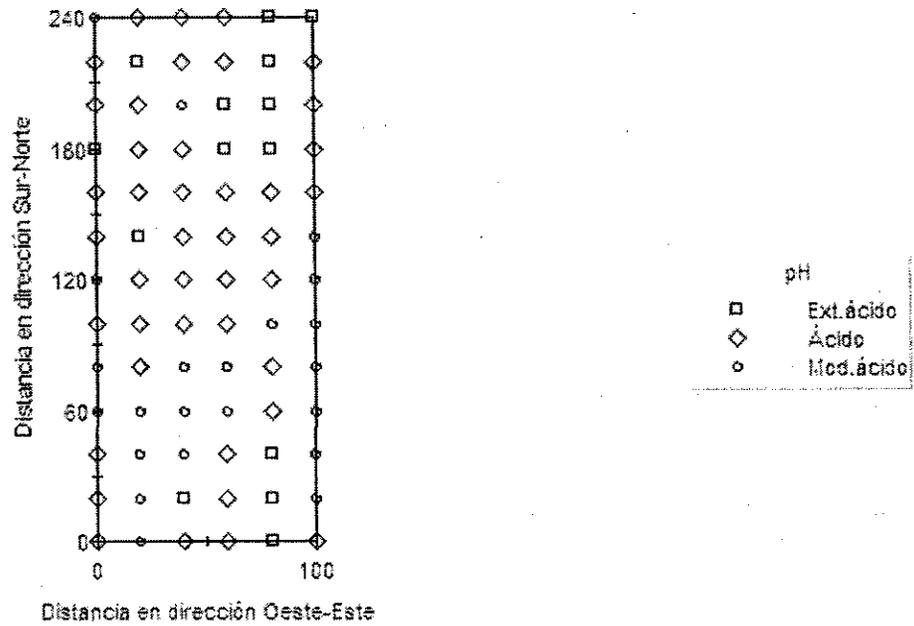


Figura A9. Localización y clasificación de los valores de pH en la parcela Zapopan.

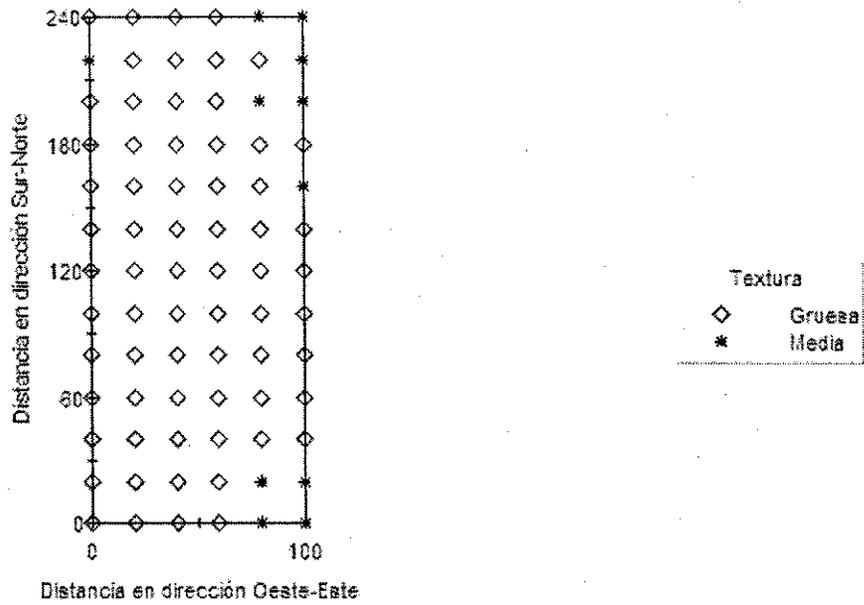
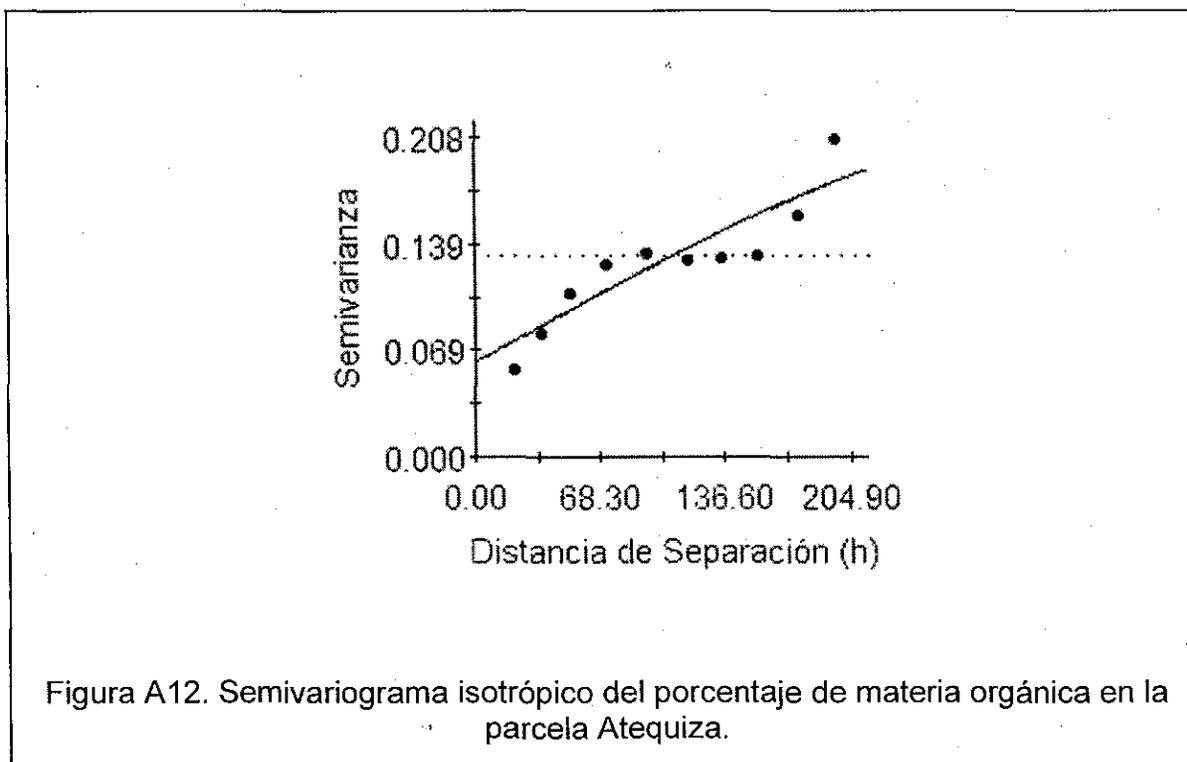
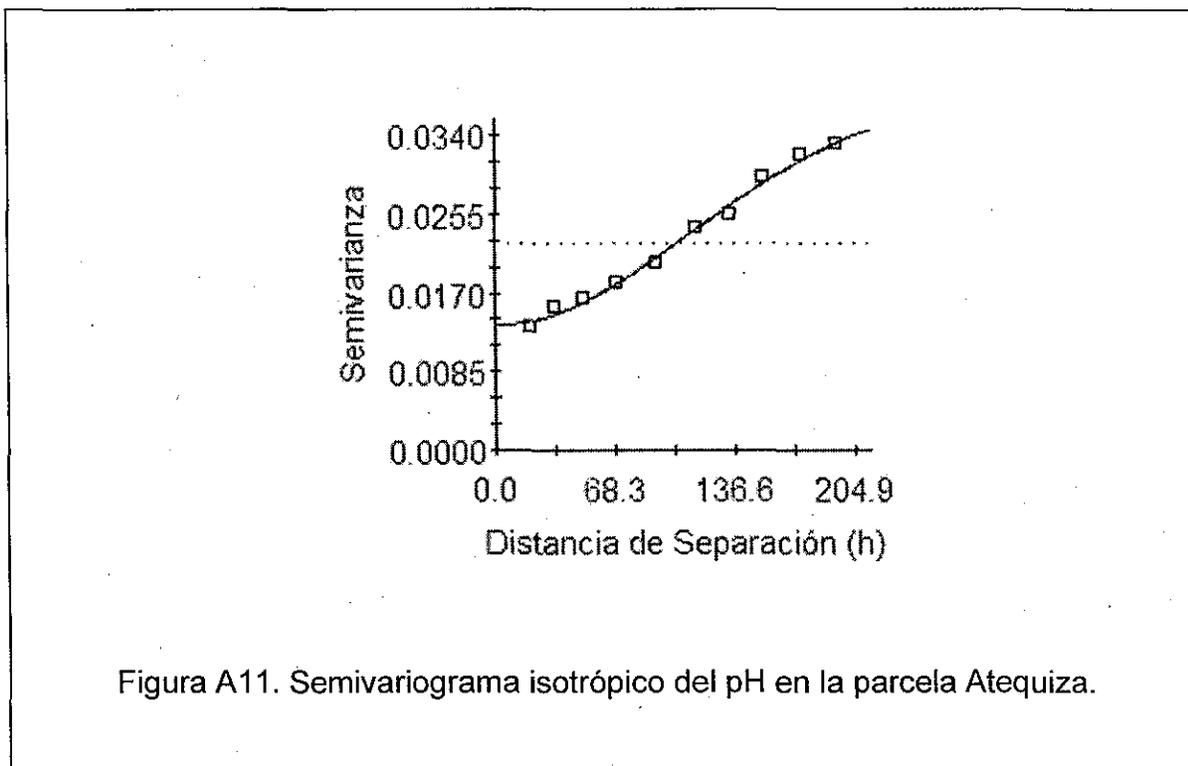


Figura A10. Localización y clasificación de los valores de porcentaje de arcilla en la parcela Zapopan.

7.3 Anexo 3. Semivariogramas resultantes en el análisis de dependencia espacial para cada variable estudiada.



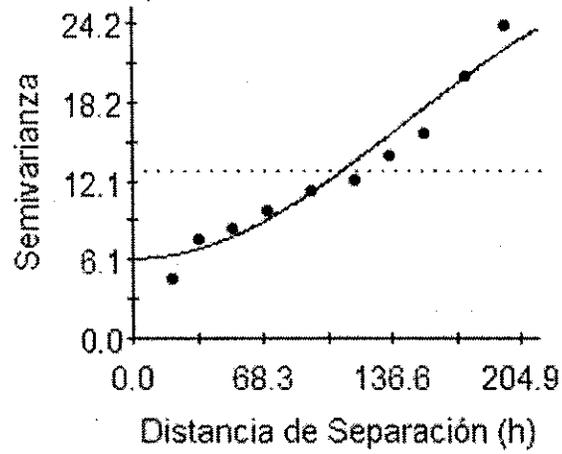


Figura A13. Semivariograma isotrópico de la capacidad de intercambio catiónico en la parcela Atequiza.

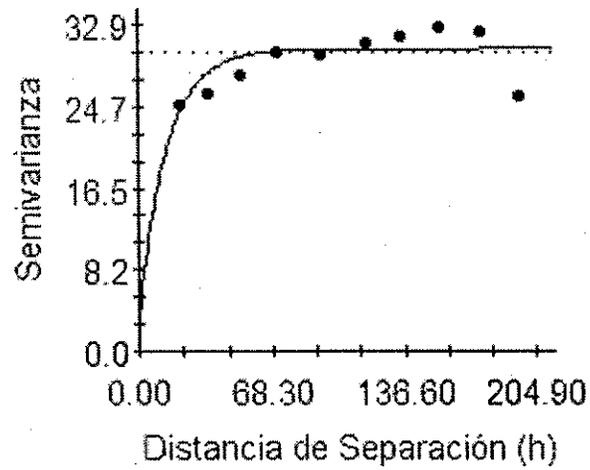


Figura A14. Semivariograma isotrópico del P-Bray en la parcela Atequiza.

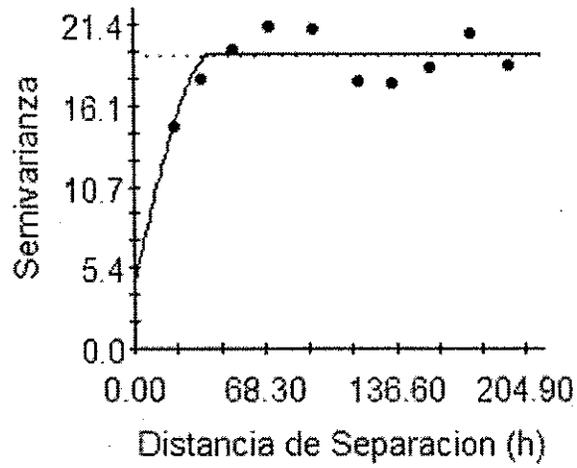


Figura A15. Semivariograma isotrópico del porcentaje de arcilla en la parcela Atequiza.

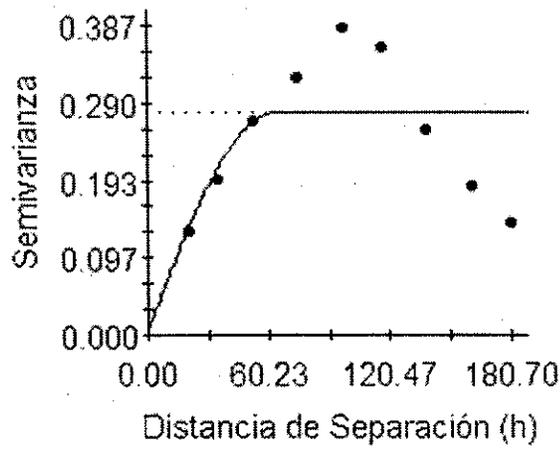


Figura A16. Semivariograma isotrópico del pH en la parcela Villa Corona.

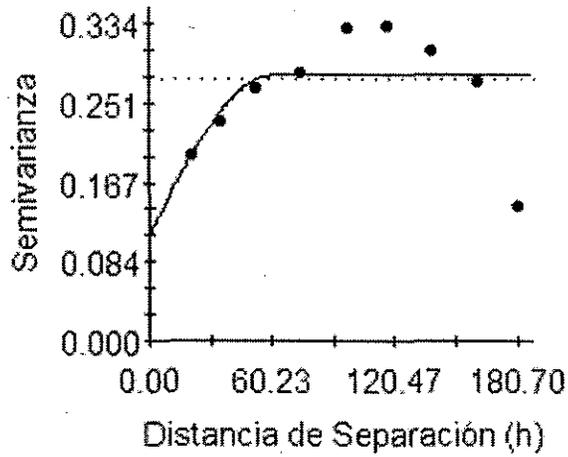


Figura A17. Semivariograma isotrópico del porcentaje de materia orgánica en la parcela Villa Corona.

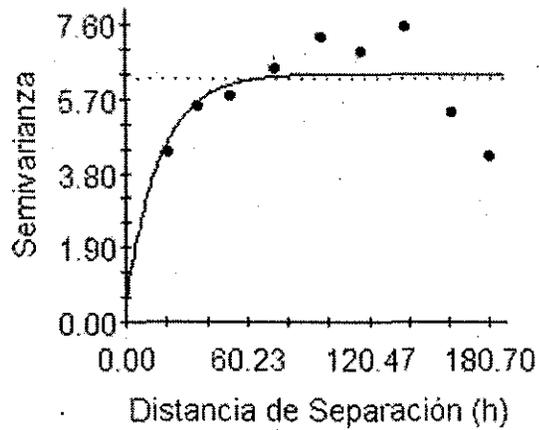


Figura A18. Semivariograma isotrópico de la capacidad de intercambio catiónico en la parcela Villa Corona.

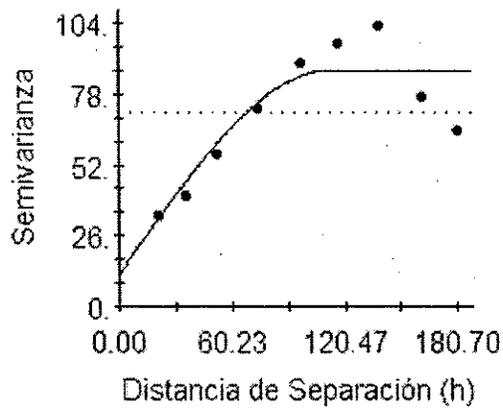


Figura A19. Semivariograma isotrópico del P-Bray en la parcela Villa Corona.

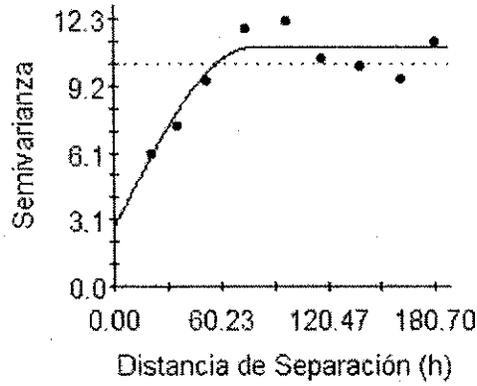


Figura A20. Semivariograma isotrópico del porcentaje de arcilla en la parcela Villa Corona.

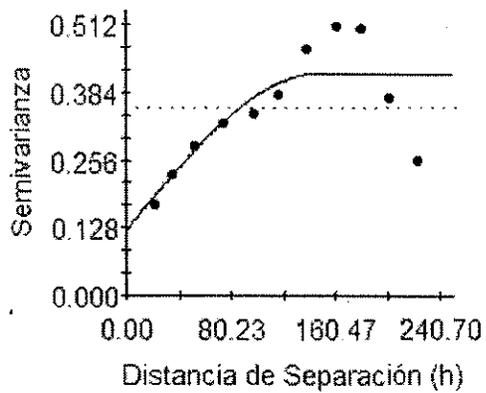


Figura A21. Semivariograma isotrópico del pH en la parcela Zapopan.

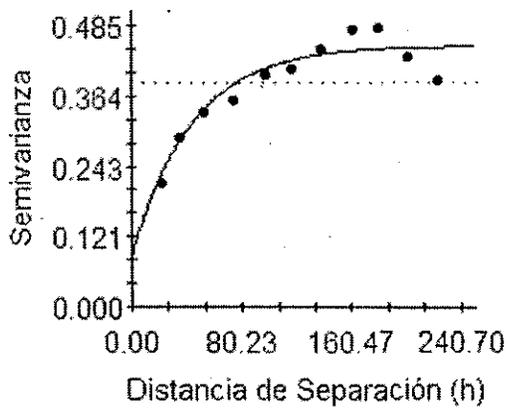


Figura A22. Semivariograma isotrópico del porcentaje de materia orgánica en la parcela Zapopan.

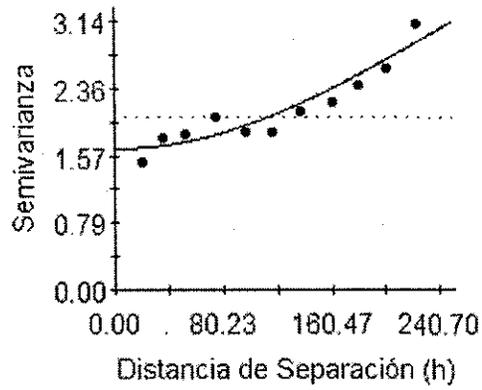


Figura A23. Semivariograma isotrópico de la capacidad de intercambio catiónico en la parcela Zapopan.

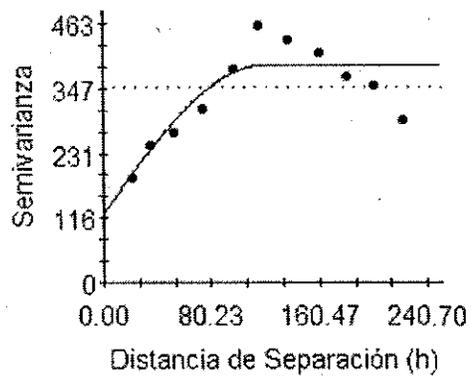


Figura A24. Semivariograma isotrópico del P-Bray en la parcela Zapopan.

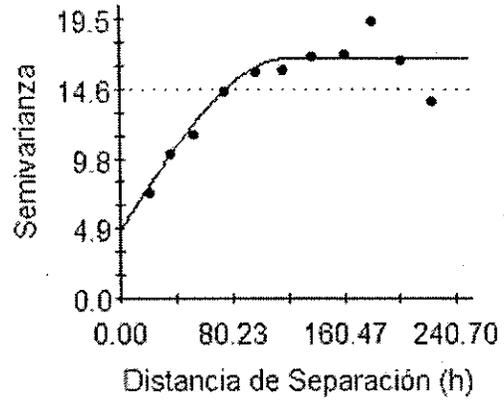
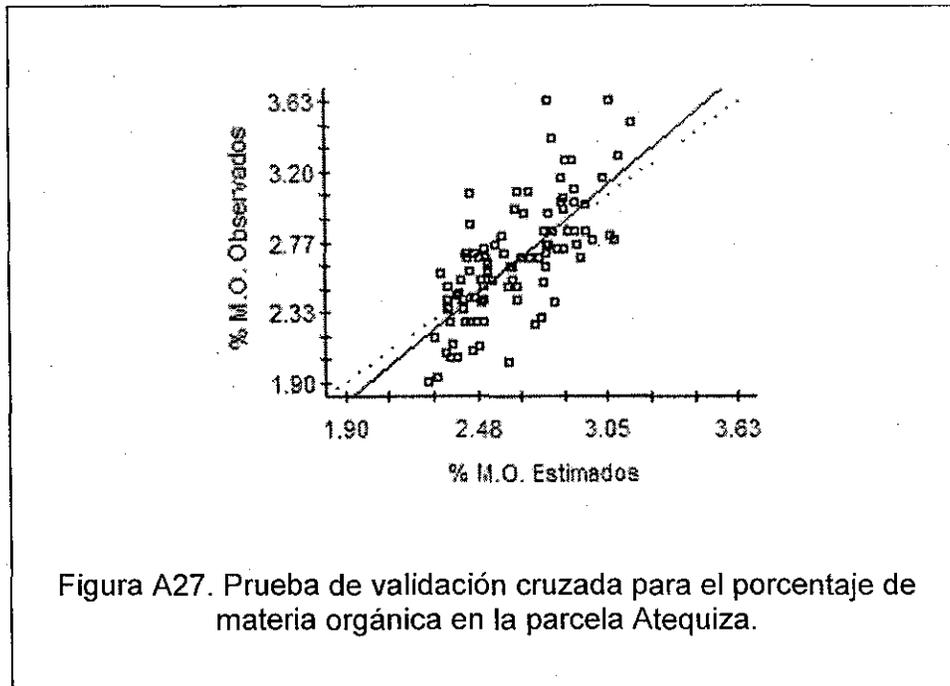
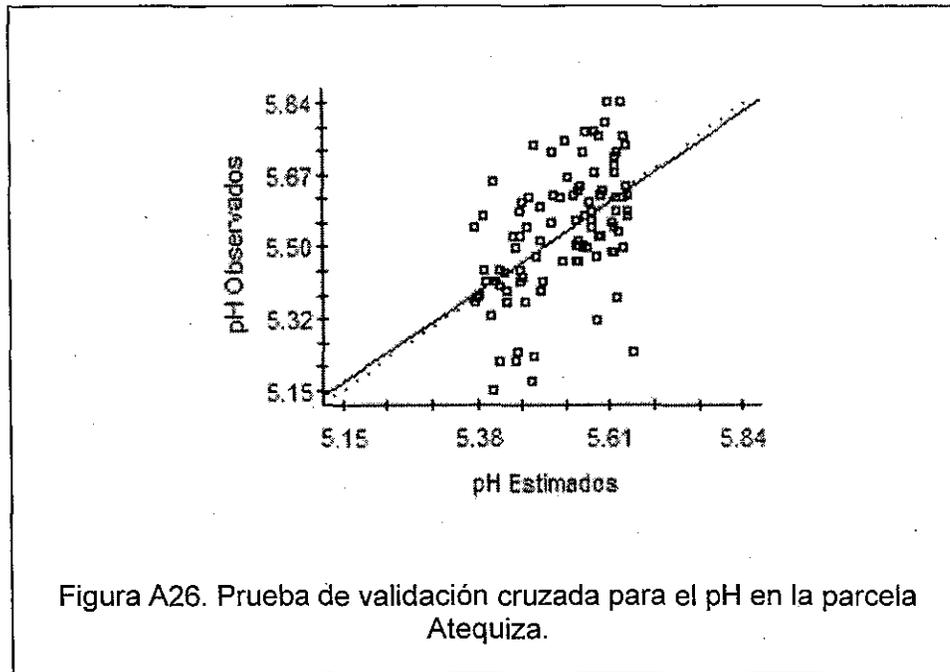
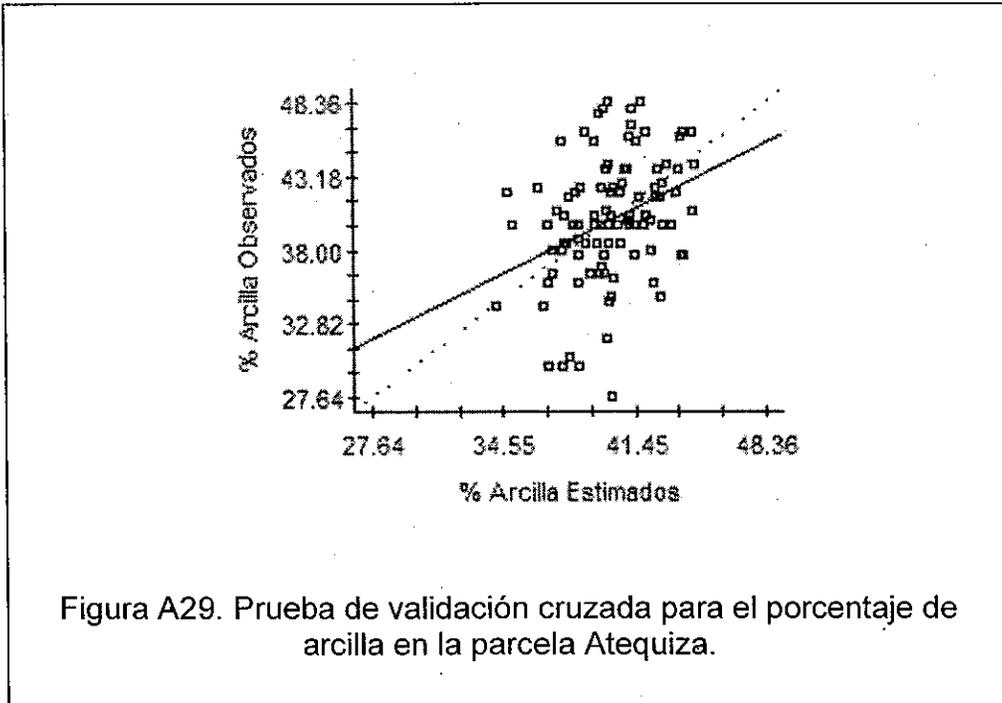
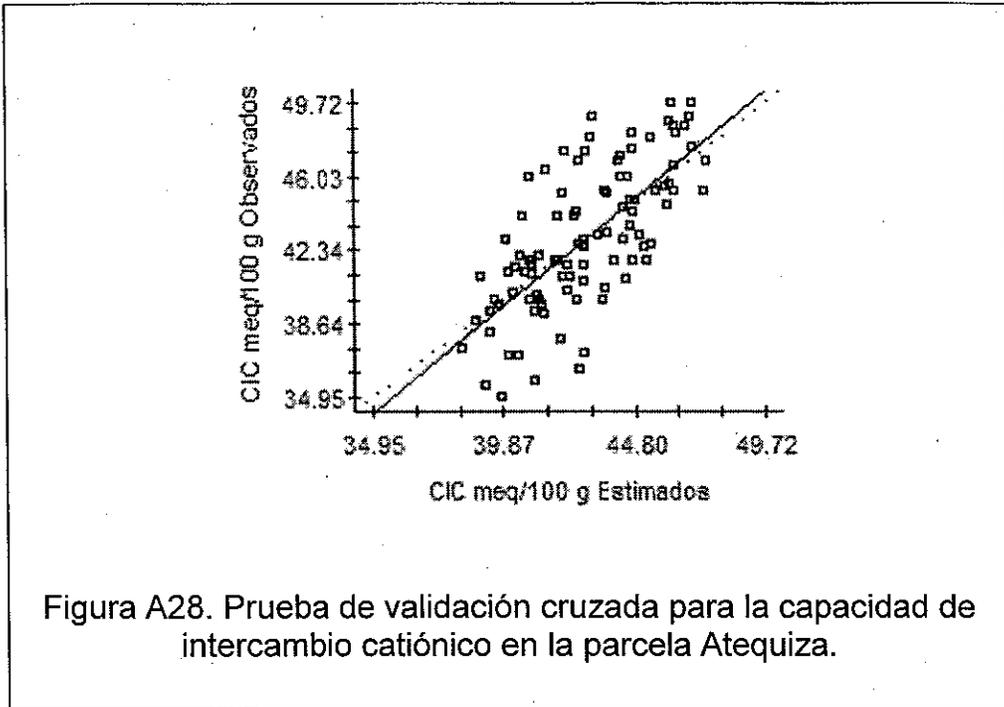
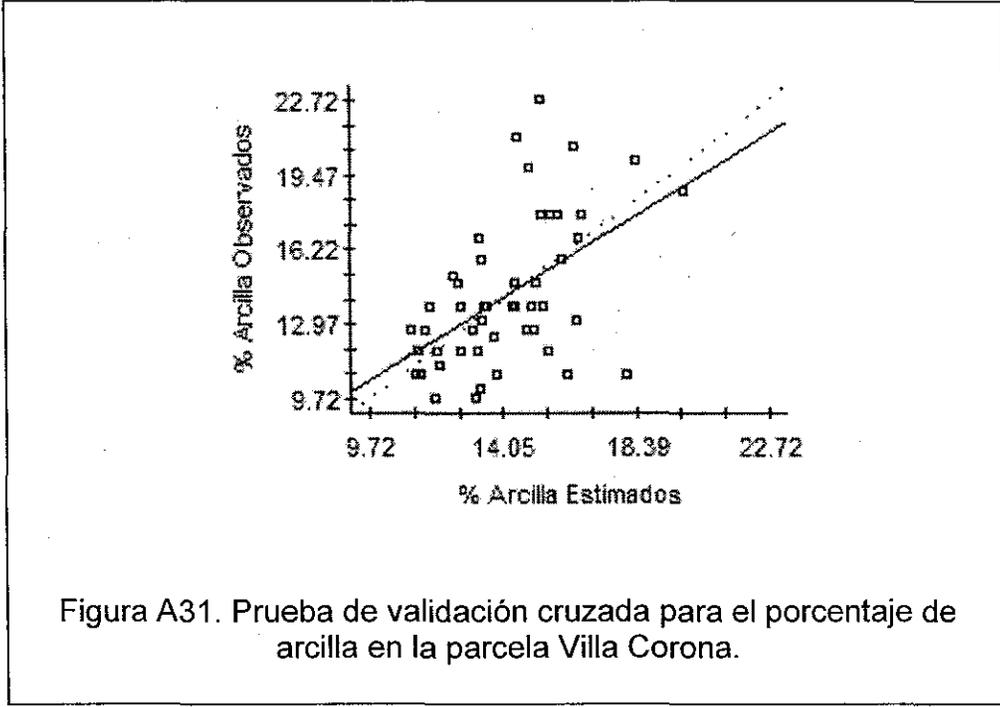
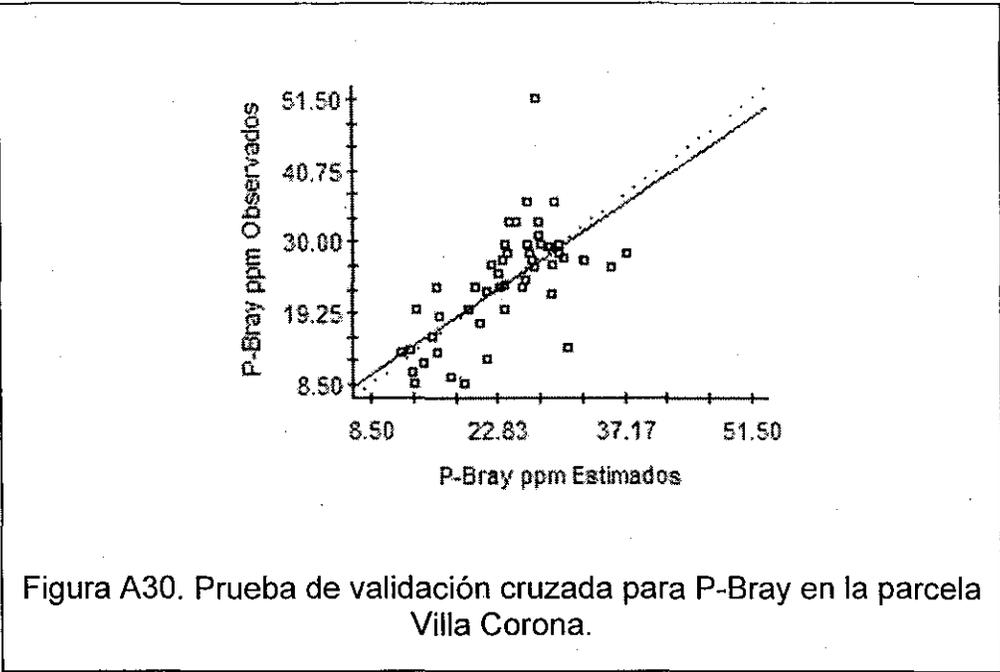


Figura A25. Semivariograma isotrópico del porcentaje de arcilla en la parcela Zapopan.

7.4 Anexo 4. Gráficas resultantes de la prueba de validación cruzada para las variables seleccionadas según modelo de mejor ajuste en los semivariogramas.







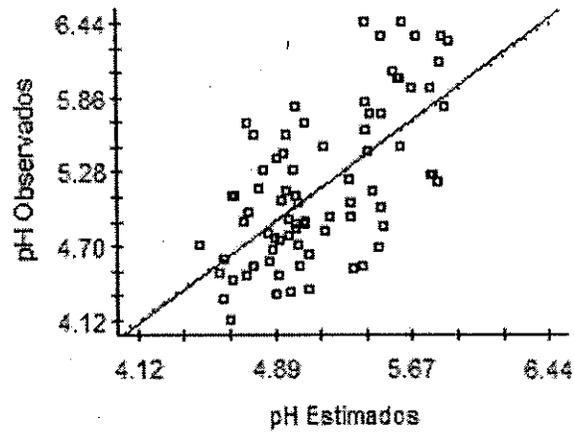


Figura A32. Prueba de validación cruzada para el pH en la parcela Zapopan.

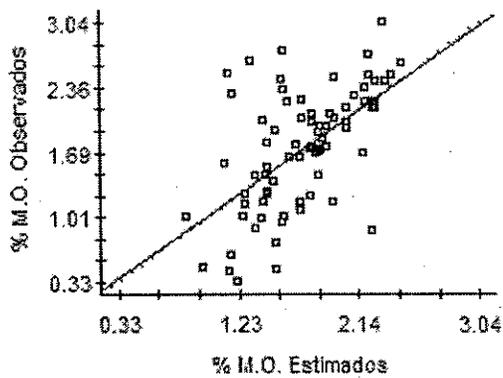
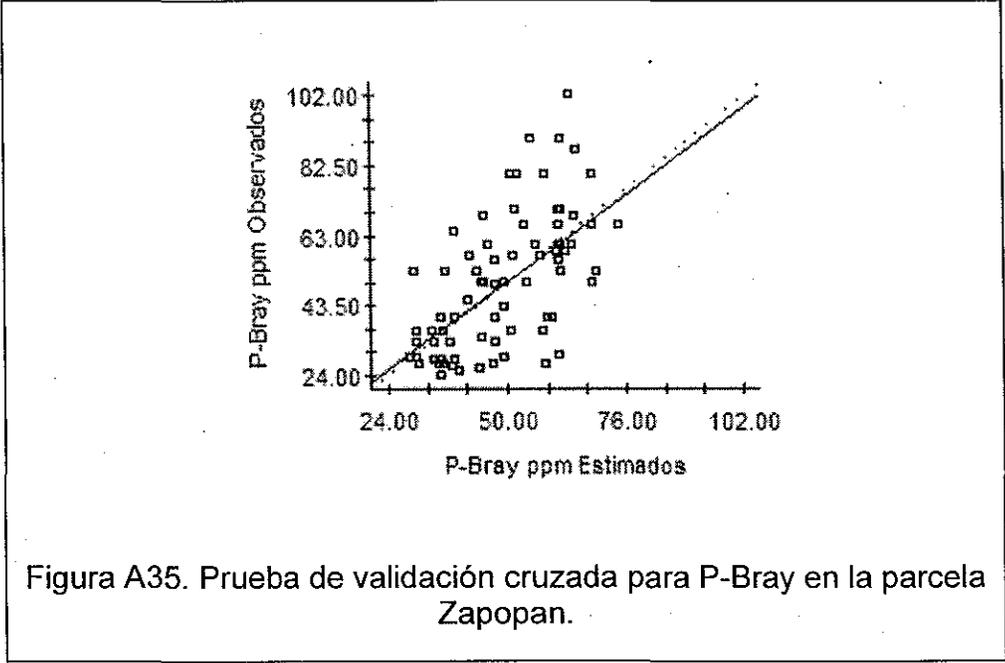
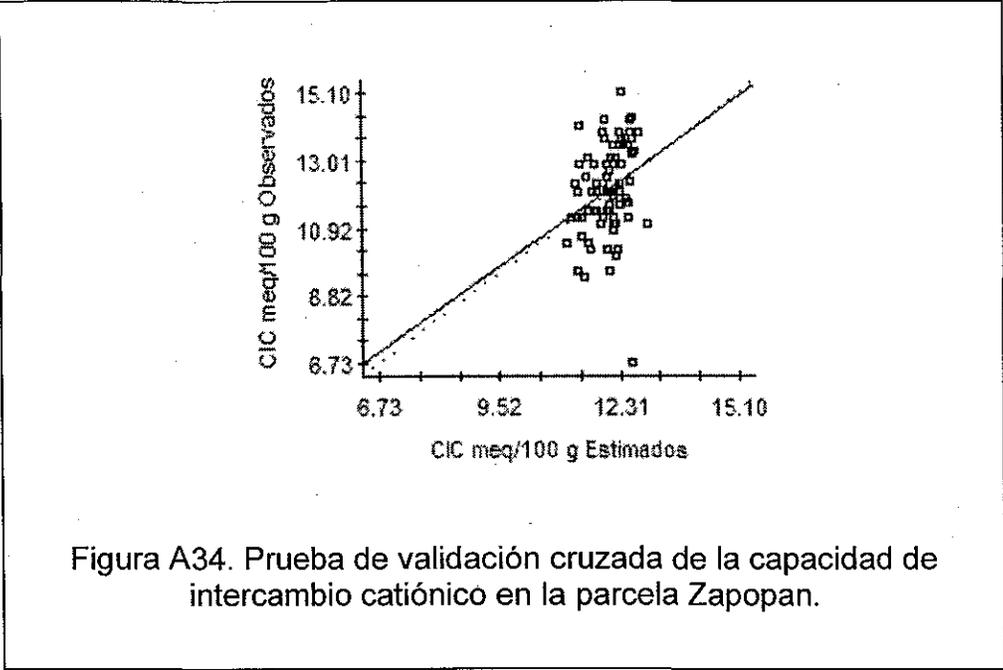


Figura A33. Prueba de validación cruzada para el porcentaje de materia orgánica en la parcela Zapopan.



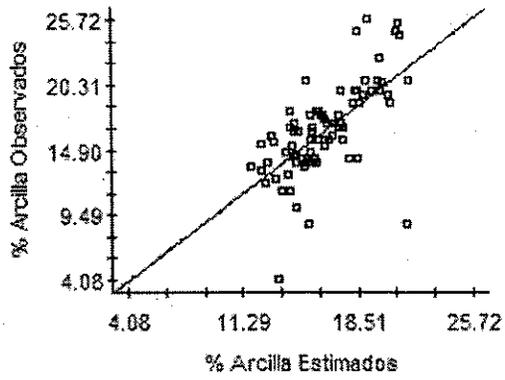


Figura A36. Prueba de validación cruzada para el porcentaje de arcilla en la parcela Zapopan.

## 8 . BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar N., A.G. 1987. Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo: Capacidad de Intercambio Catiónico. SMCS Publicación No.1:93-104. México.
- Armstrong M. 1998. Basic linear geostatistics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Alemania.
- Baldock J.A. y P.N. Nelson. 2000. Handbook of soil science. Soil organic matter. M.E. Sumner editor en jefe. CRC Press. p. B25-B72. E.U.A.
- Bloom P.R. 2000. Handbook of soil science. Soil pH and pH buffering. M.E. Sumner editor en jefe. CRC Press. p.B333-B351. E.U.A.
- Brady, N.C. y R.R. Weil. 1996. The nature and properties of soils Prentice Hall, Inc. E.U.A.
- Brejda, J.J., T.B. Moorman, J.L. Smith, D.L. Karlen, D.L. Allan y T.H. Dao. 2000. Distribution and variability of surface soil properties at a regional scale. SSSAJ 64:974-982 E.U.A.
- Brouder, S., B. Hofmann y H.F. Reetz Jr. 2001. Evaluating spatial variability of soil parameters for management. Better Crops No.2 85:8-11. E.U.A.
- Bullock D.G., R.G. Hoef, P. Dorman, T. Macy y R. Olson. 1994. Nutrient management with intensive soil sampling and differential fertilizer spreading. Better Crops Vol. 78, No. 4:10-12. E.U.A.
- Cajuste, L.J. 1987. El Fósforo aprovechable en los suelos. SMCS Publicación No.1, México
- Cassel D.K., O. Wendroth y D.R. Nielsen. 2000. Assessing spatial variability in an agricultural experiment station field: opportunities arising from spatial dependence. Agronomy Journal 92:706-714. E.U.A.
- Castellanos, J.Z., J.X. Uvalle B. y A. Aguilar S. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. Colección INCAPA. México

- Chevallier T., M. Voltz, E. Blanchart, J.L. Chotte, V. Eschenbrenner, M. Mahieu y A. Albrecht. 2000. Spatial and temporal changes of soil C after establishment of a pasture on a long-term cultivated vertisol. *GEODERMA* 94:43-58. E.U.A.
- Colegio de Postgraduados. 1991. Manual de conservación del suelo y del agua. 3° ed. Secretaría de Agricultura y Recursos Humanos y Secretaría de Programación y Presupuesto. México.
- Cressie, N. 2001. Variogram. *Encyclopedia of Environmetrics*. Vol.4:2313-2316. E.U.A.
- Cristobal A., D., O. Palacios V. y F. Ruiz F. 1996. Comparación de métodos de interpolación en variables hídricas del suelo. *Agrociencia* 30: 329-343. México
- Curti-Díaz S.A., R. Mosqueda Vázquez y M.A. Rodríguez Peña. 1997. Ácido giberélico, ácido cloroetilfosfónico y urea en la floración y rendimiento del naranjo "Valencia". *Agrociencia* Vol. 31 No. 3: 297-303. México.
- Etchevers B., J.D. 1999. Técnicas de diagnóstico útiles en la medición de la fertilidad del suelo y el estado nutrimental de los cultivos. *Terra* Vol.17 No.3:209-219. México
- Fortin, M.J., M.R.T. Dale y J.V.Hoef. 2001. Spatial analysis in ecology. *Encyclopedia of Environmetrics*. Vol.4:2051-2058. E.U.A.
- Gamma Design Software, LLC. 2004. Software GS+ v. 7.0. Geostatistics for the environmental sciences. Edición Profesional. Stanford Center for Reservoir Forecasting y The Board of Trustees of the Leeland Stanford Junior University. E.U.A.
- García de M., Enriqueta. 1987. Modificaciones al Sistema de Clasificación climática de Copen para adaptarla a las condiciones de la República mexicana. Geocentro. SIGSA. México.
- Gaston, L.A., M.A. Locke, R.M. Zablutowicz y K.N. Reddy. 2001. Spatial variability of soil properties and weed populations in the Mississippi Delta. *SSSAJ* 65:449-459. E.U.A.

- Gee, G.W. y J.W. Bauder. 1986. Particle-size análisis. SSSAJ. Agronomy monograph No.9 E.U.A.
- Goijberg R., G. y A. Aguilar S. 1987. pH del suelo y necesidades de cal. SMCS Publicación No.1. México
- Havlin, J.L., J.D. Beaton, S.L. Tisdale y W.L. Nelson. 1999. Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management. Prentice Hall. E.U.A.
- Hernández, A., L. Lugo, A. Mora-Garcés, J. Sánchez y E. Arends. 2003. Variabilidad espacial edáfica en el sistema tradicional de conucos en el Amazonas de Venezuela. Investigación Agraria: Sistemas Recursos Forestales Vol.12(2):43-54. España
- INEGI. 1974. Cartas Edafológica y de Uso del Suelo escala 1:50,000: Cocula F13-D74; Chapala F13-D76 y Guadalajara Oeste F13-D65. INEGI. México
- INTA. 2000. Glosario de términos en agricultura de precisión.  
<http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/articulos.htm> Argentina
- Isaaks, E.H. y R.M. Srivastava. 1989. Applied geostatistics. Oxford University Press. E.U.A.
- Jackson, M.L. 1958. Soil chemical analysis. Prentice Hall, Inc. E.U.A.
- Jiao Y. C.A. Grant y L.D. Bailey. 2004. Effects of phosphorus and zinc fertilizer on cadmium uptake and distribution in flax and durum wheat. Journal of the science of food and agriculture. Vol. 84 No. 8:777-785.
- Kravchenko A.N. 2003. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. SSSAJ 67:1564-1571. E.U.A.
- Kravchenko A.N. y D.G. Bullock. 2002. Spatial variability of soybean quality data as function of field topography I. Spatial data analysis. Crop Science 42:804-815. E.U.A.
- León A., R. y A. Aguilar S. 1987. Materia Orgánica. SMCS Publicación No.1. México
- León-Arteta., R. 2001. Comparación de métodos de análisis mecánico de suelos. Terra Vol.19 No.3:219-225. México

- Liu, Z.X. y T. Lisheng. 2002. The spatial variability of OM and total NPK in cinnamon soil in the west part of Northeast China. 17th World Congress of Soil Science. Paper No.2188.
- Logan T.J. 2000. Handbook of soil science. Soils and environmental quality. M.E. Sumner editor en jefe. CRC Press. P. G155-G169. E.U.A.
- Mckone T.E. y R.L. Maddalena. 1997. Soil contamination and human exposure: a comprehensive assesment framework. International journal of toxicology. Vol. 16 No. 4:319:337
- Melchiori R. J.M., F.O. García y H. Echeverría. 2000. Variabilidad espacial en algunas propiedades del suelo: Asociación con las variaciones en el rendimiento del trigo.  
<http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/articulos.htm> Argentina
- Mendenhall, W. y T. Sincich. 1997. Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias. Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
- MINITAB 2003. Meet MINITAB® Release 14. Minitab Inc. E.U.A.
- Mortvedt J.J. 2000. Handbook of soil science. Bioavailability of micronutrients. M.E. Sumner editor en jefe. CRC Press. P. D71-D88. E.U.A.
- Mulla, D.J. y A.B. McBratney. 2000. Soil spatial variability. Handbook of soil science
- Needelman, B.A., W.J. Gburek, A.N. Sharpley y G.W. Petersen. 2001. Environmental management of soil phosphorus: modeling spatial variability in small fields. SSSAJ 65:1516-1522 E.U.A.
- O'Halloran, I.P. 2001. Precision agriculture. Encyclopedia of Environmetrics, Vol.3:1628-1630 E.U.A.
- Olsen S.R. y L.A. Dean. 1965. Black C.A. Editor en jefe. Methods of soil analysis. Chemical and microbiological properties. Serie Agronomy No. 9. E.U.A.

- Otero, L., F. Ortega S. y M. Morales. 1998. Participación de la arcilla y la materia orgánica en la capacidad de intercambio catiónico de vertisoles de la provincia Granma. *Terra* Vol.16 No.3:189-194 México
- Paz, A. M., J. Gómez y M.T. Taboada. 1996. Análisis geoestadístico de las propiedades generales de un suelo de cultivo. *Investigación Agraria: Producción y Protección Vegetal*. Vol.11(1): 133-160 España
- Pellerin S., A. Mollier y D. Plénet. 2000. Phosphorus deficiency affects the rate of emergence and number of maize adventitious nodal roots. *Agronomy Journal* 92: 690-697. E.U.A.
- Petersen, R.G. y L.D. Calvin. 1986. Sampling. *Methods of soil analysis Part 1. SSSAJ. Agronomy monograph No.9* E.U.A.
- Rodríguez N., F. y F. Burguete H. 1987. *Muestreo de Suelos*. SMCS Publicación No.1. México
- Ruiz C., J.A., I.J. González A., J. Anguiano C., I. Viscaíno V., D. Ibarra C., J. Alcalá G., S. Espinoza V. y Flo 2003. *Estadísticas Climatológicas Básicas para el Estado de Jalisco (Período 1961-2000)* INIFAP-CIRPAC Libro Técnico No.1. México
- Salgado G., S., R. Núñez E., J.J. Peña C., J.D. Etchevers B., D.J. Palma L. y M. Soto H. 2000. Respuesta de la soca de caña de azúcar a la fertilización NPK. *Agrociencia* Vol.34 No.6:689-698 México
- Sampson, P.D. 2001. Spatial covariance. *Encyclopedia of Environmetrics* Vol. 4:2058-2067 E.U.A.
- Singer M.J. y S. Ewing. 2000. *Handbook of soil science. Soil Quality*. M.E. Sumner editor en jefe. CRC Press. P. G271 –G294. E.U.A.
- Skopp J.M. 2000. *Handbook of soil science. Physical properties of primary particles*. M.E. Sumner editor en jefe. CRC Press. p. A3-A17. E.U.A.
- Smith, L.J. y D. Rains. 1996. Grid soil testing and variable-rate fertilization for profitable sugarbeet production. *Better Crops* Vol.80, No.3:30 y 31 E.U.A.

- Solie, J.B., W.R. Raun y M.L. Stone. 1999. Submeter spatial variability of selected soil and Bermudagrass production variables SSSAJ 63:1724-1733 E.U.A.
- Sposito G. 2000. Handbook of soil science. Ion exchange phenomena. M.E. Sumner editor en jefe. CRC Press. p. B241-B262. E.U.A.
- Stolt, M.H., M.H. Genthner, W.L. Daniels y V.A. Groover. 2001. Spatial variability in Palustrine wetlands. SSSAJ 65:527-535 E.U.A.
- Stutter M.I., L.K. Deeks y M.F. Billett. 2004. Spatial variability in soil ion exchange chemistry in a granitic upland catchment. SSSAJ 68: 1304-1314 E.U.A.
- Urban, D.L. 2003. Spatial analysis in ecology. Geostatistical data analysis. <http://www.env.duke.edu/landscape/classes/env352/autocorr.pdf> E.U.A.
- Vega, S.C. y S.P. Kaluzny. 2001. S+Spatialstats. Encyclopedia of Environmetrics, Vol. 4:1899-1910 E.U.A.
- Vieira S., R., A. Paz G., S. Dechen y I. De María. 2002. Spatial variability of nutrients in successive years. 17th World Congress of Soil Science. Paper No.1314
- Volke H. V., J.D. Etchevers B., A. Sanjuan R. y T. Silva P. 1998. Modelo de balance nutrimental para la generación de recomendaciones de fertilización para cultivos. Terra Vol. 16 No. 1: 79-91 México.
- Warrick, A.W., Myers, D.E. y Nielsen, D.R. 1986. Geostatistical methods applied to soil science . SSSAJ Agronomy monograph No.9. E.U.A.
- Wollenhaupt, N.C. y R.P. Wolkowski. 1994. Grid soil sampling. Better Crops Vol.78, No.4:6-9. E.U.A.
- Yadvinder S., A. Dobermann, S. Bijay, K.F. Bronson y C.S. Khind. 2000. Optimal phosphorus management strategies for wheat-rice cropping on a loamy sand. SSSAJ 64:1413-1422 E.U.A.
- Young, F.J., R.D. Hammer y F. Williams. 1998. Evaluating central tendency and variance of soil properties within map units. SSSAJ 62: 1640-1646 E.U.A.
- Zar, J.H. 1999. Biostatistical Analysis. Prentice Hall 4th Edition. E.U.A.