

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

ESCUELA DE POST-GRADO
Especialidad de Suelos



CARACTERIZACION Y DISTRIBUCION ESPACIAL DE SUELOS
ALUVIALES HIDROMORFICOS CON PALMA ACEITERA (*Elaeis
guineensis* Jacq) EN PALMA DEL ESPINO

Tesis para optar el grado de:

MAGÍSTER SCIENTIAE

LUIS BENIGNO ZUÑIGA CERNADES

Lima – Perú

2007

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

ESCUELA DE POSTGRADO

Especialidad de Suelos

**“CARACTERIZACIÓN Y DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE SUELOS ALUVIALES
HIDROMORFICOS CON PALMA ACEITERA (*Elaeis guineensis* Jacq) EN
PALMA DEL ESPINO”**

Tesis para optar el Grado de:

MAGISTER SCIENTIAE

LUIS BENIGNO ZUÑIGA CERNADES

Sustentada y Aprobada ante el siguiente jurado:

**Ing. M. S. Luis Rodrigo Tomassini Vidal
PRESIDENTE**

**Ing. M.S. Luis Rubén Bazán Tapia
PATROCINADOR**

**Ing. M.S. Braulio La Torre Martínez
MIEMBRO**

**Dr. Oscar Oswaldo Loli Figueroa
MIEMBRO**

Lima – Perú

2007

A Margot, mi esposa.

A mis hijos Lawrence, Francis y Luis Alejandro.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional Agraria La Molina en las personas Ruben Bazán Tapia, y Oscar Loli Figueroa por la oportunidad, apoyo y orientación en la ejecución de este trabajo.

A mi amigo, compañero y colega Tomás Melgarejo

Al instituto de Cultivos Tropicales en las personas Enrique Arévalo, Rolando Reyes y Lucinda Vela por el apoyo en la ejecución de este trabajo.

A la empresa agroindustrial Palma del Espino, en las personas Carlos Arribas, Ruperto Raygada, Abraham Ramírez y Julio Vera por la confianza y facilidades otorgadas en la realización del presente estudio de suelos.

A los compañeros de trabajo y colegas del Instituto de Cultivos Tropicales, por la amistad y el apoyo recibido.

CONTENIDO

Lista de Cuadros	v
Lista de Figuras	vi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISION DE LITERATURA	
2.1 Generalidades del cultivo de palma aceitera	3
2.2 Clima y suelos y necesidades de fertilizantes	4
2.2.1 Clima	4
2.2.2 Suelo	4
2.3 Nutrición de la palmera de aceite	5
2.4 Variabilidad espacial de los suelos	9
III. MATERIALES Y METODOS	
3.1 Características del sitio en estudio	15
3.2 Muestreo general del campo, perfiles y experimento factorial (CP1)	15
3.2.1 Muestreo de campo	15
3.2.2 Perfiles	16
3.2.3 Experimento de fertilización	17
3.2 Análisis de suelos	19
3.3 Métodos estadísticos	19
3.3.1 Estadísticas descriptivas	19
3.3.2 Análisis geoestadístico	20
3.3.3 Análisis estadístico del experimento CP1	22

VI. RESULTADOS	
4.1 Parámetros estadísticos de las propiedades químicas y físicas del suelo	24
4.2 Análisis de la estructura espacial de las propiedades del suelo	25
4.3 Análisis de la distribución espacial de las propiedades del suelo	31
4.4 Análisis de variancia del experimento CP1	38
4.5 Análisis de la superficie de respuesta del experimento CP01	40
V. DISCUSIONES	
5.1 Estatus de las propiedades químicas y físicas del suelo	52
5.2 Estructura espacial de las propiedades del suelo	54
5.3 Distribución espacial del rendimiento de racimos y de las propiedades del suelo	55
5.4 Análisis de variancia superficie de respuesta del experimento CP1	59
VI. CONCLUSIONES	61
VII. RESUMEN	62
VIII. LITERATURA CITADA	64
IX. ANEXO	
Anexo 1. Comparativo del contenido de los principales nutrientes en el suelo entre los años 1980 y 1997.	72

Lista de Cuadros

Cuadro 1. Interpretación del contenido de nutrientes en el suelo para el cultivo de palma aceitera.	5
Cuadro 2. Nutrientes inmovilizados anualmente en los racimos de palma aceitera (kg ha^{-1}).	6
Cuadro 3. Interpretación del contenido de nutrientes en las hojas de palma aceitera (>6 años), hoja No. 17.	9
Cuadro 4. Tratamientos establecidos en el experimento factorial CP1.	17
Cuadro 5. Propiedades analizadas en las muestras de suelo.	19
Cuadro 6. Estadísticas descriptivas del rendimiento de racimo frescos ($n=196$) y algunas propiedades de suelo estudiadas a 0 - 20 cm ($n=196$) y 20 - 40 cm ($n=93$) de profundidad.	26
Cuadro 7. Estadísticas descriptivas de variables medidas en las calicatas ($n=26$).	27
Cuadro 8. Cambios en los contenidos de los principales elementos mayores después de 17 años de aprovechamiento intensivo ($n=33$) 1980 y 1997.	28
Cuadro 9. Parámetros de los semivariogramas teóricos de las propiedades físicas y químicas medidas a nivel superficial y subsuperficial del suelo.	29
Cuadro 10. Rendimiento de racimos de palma aceitera (t ha^{-1}) según los tratamientos ensayados en el experimento factorial CP01.	44

Lista de Figuras

- Figura 1.** Semivariograma esquemático con una variancia en el origen o efecto pepita 'Nugget effect' de 2, un meseta de 7 y un rango de 7 (Coe *et al.*, 2003). 12
- Figura 2.** Localización del área en estudio dentro de la región San Martín. Y detalles del muestreo dentro de área en estudio. 18
- Figura 3.** Mapa de distribución de las aplicaciones de urea y superfosfato triple en la plantación un año antes de la realización del presente estudio. 32
- Figura 4.** Mapa de distribución de las fertilizaciones con cloruro de potasio y kieserita en la plantación un año antes de la realización del presente estudio. 33
- Figura 5.** Semivariograma y mapa krigeado del rendimiento de fruta de palma 34
- Figura 6.** Semivariogramas y mapas krigeados del nivel de pH en el horizonte (a) superficial, y (b) subsuperficial del suelo. 35
- Figura 7.** Semivariogramas y mapas krigeados del nivel de N en el horizonte (a) superficial, y (b) subsuperficial del suelo. 36
- Figura 8.** Semivariogramas y mapas krigeados del nivel de P en el horizonte (a) superficial, y (b) subsuperficial del suelo. 37
- Figura 9.** Semivariogramas y mapas krigeados del nivel de K en el horizonte (a) superficial, y (b) subsuperficial del suelo. 38

- Figura 10.** Semivariogramas y mapas krigeados del nivel de Mg en el horizonte (a) superficial, y (b) subsuperficial del suelo. 39
- Figura 11.** Semivariogramas y mapas krigeados del nivel de CE en el horizonte (a) superficial, y (b) subsuperficial del suelo. 40
- Figura 12.** Semivariogramas y mapas krigeados del nivel de Ao en el horizonte (a) superficial, y (b) subsuperficial del suelo. 41
- Figura 13.** Semivariogramas y mapas krigeados del nivel de Li en el horizonte (a) superficial, y (b) subsuperficial del suelo. 42
- Figura 14.** Semivariogramas y mapas krigeados del nivel de Ar en el horizonte (a) superficial, y (b) subsuperficial del suelo. 43
- Figura 15.** Superficie de respuestas significativas ($p < 0.01$) del rendimiento de racimos de palma aceitera ($t\ ha^{-1}$) sin aplicación de urea. (a) Incrementando la dosis de superfosfato triple, pero manteniendo constante el cloruro de potasio y la kieserita en 2000 y 3000 $g\ planta^{-1}$, respectivamente; (b) Incrementando la dosis de cloruro de potasio, pero manteniendo constante el superfosfato triple y la kieserita en 1500 y 3000 $g\ planta^{-1}$, respectivamente; (c) Incrementando simultáneamente las dosis de superfosfato triple y de cloruro de potasio, pero manteniendo constante la kieserita en 1500 $g\ planta^{-1}$; (d) Incrementando simultáneamente las dosis de superfosfato triple y de kieserita, pero manteniendo constante el cloruro de potasio en 2000 $g\ planta^{-1}$; (e) Incrementando simultáneamente las dosis de cloruro de potasio y de kieserita, pero manteniendo constante el superfosfato triple en 750 $g\ planta^{-1}$; (f) Incrementando simultáneamente las dosis de cloruro de potasio y de

kieserita, pero manteniendo constante el superfosfato triple en 1500 g planta⁻¹. La barra oscura representa el rendimiento del testigo sin-fertilización. Las líneas verticales representan el error estándar.

47

Figura 16. Superficie de respuestas significativas ($p < 0.01$) del rendimiento de racimos de palma aceitera (t ha⁻¹) cuando se aplicó 1500 g planta⁻¹ de urea. (a) Incrementando simultáneamente la dosis de superfosfato triple y cloruro de potasio sin aplicación de kieserita; (b) Incrementando simultáneamente la dosis de superfosfato triple y de kieserita sin aplicación de cloruro de potasio; (c) Incrementando las dosis de cloruro de potasio y de kieserita sin aplicación de superfosfato triple; (d) Incrementando la dosis de superfosfato triple, pero manteniendo constante el cloruro de potasio en 2000 g planta⁻¹ sin aplicación de kieserita; (e) Incrementando la dosis de superfosfato triple, pero manteniendo constante el cloruro de potasio y la kieserita en 750 y 3000 g planta⁻¹, respectivamente; (f) Incrementando la dosis de superfosfato triple, pero manteniendo constante el cloruro de potasio en 4000 g planta⁻¹ sin aplicación de kieserita. La barra oscura representa el rendimiento del testigo sin-fertilización. Las líneas verticales representan el error estándar.

48

Figura 17. Superficie de respuestas significativas ($p < 0.01$) del rendimiento de racimos de palma aceitera (t ha⁻¹) cuando se aplicó 1500 g planta⁻¹ de urea. (a) Incrementando la dosis de superfosfato triple, pero manteniendo constante el cloruro de potasio y la kieserita en 4000 y 1500 g planta⁻¹, respectivamente; (b) Incrementando la dosis de superfosfato triple, pero

manteniendo constante el cloruro de potasio y la kieserita en 4000 y 3000 g planta⁻¹, respectivamente; (c) Incrementando la dosis de cloruro de potasio sin aplicación de superfosfato triple, pero con una dosis constante de kieserita a 1500 g planta⁻¹); (d) Incrementando la dosis de cloruro de potasio, pero manteniendo constante el superfosfato triple y la kieserita en 750 y 3000 g planta⁻¹, respectivamente; (e) Incrementando la dosis de cloruro de potasio, pero manteniendo constante el superfosfato triple y la kieserita en 1500 y 3000 g planta⁻¹, respectivamente; (f) Incrementando la dosis de kieserita sin aplicación de superfosfato triple, pero manteniendo constante el cloruro de potasio en 2000 g planta⁻¹. La barra oscura representa el rendimiento del testigo sin-fertilización. Las líneas verticales representan el error estándar.

49

Figura 18. Superficie de respuestas significativas ($p < 0.01$) del rendimiento de racimos de palma aceitera (t ha⁻¹) cuando se aplicó 1500 g planta⁻¹ de urea. (a) Incrementando la dosis de kieserita sin aplicación de superfosfato triple, pero manteniendo constante el cloruro de potasio en 4000 g planta⁻¹, respectivamente; (b) Incrementando la dosis de kieserita, pero manteniendo constante el superfosfato triple a 750 g planta⁻¹ sin aplicación de cloruro de potasio; (c) Incrementando la dosis de kieserita, pero manteniendo constante el superfosfato triple y el cloruro de potasio en 750 y 2000 g planta⁻¹), respectivamente; (d) Incrementando la dosis de kieserita, pero manteniendo constante el superfosfato triple y el cloruro de potasio en 1500 y 2000 g planta⁻¹, respectivamente; (e) Incrementando simultáneamente las dosis de

superfosfato triple y de cloruro de potasio sin aplicación de kieserita; (f) Incrementando simultáneamente las dosis de superfosfato triple y de cloruro de potasio, pero manteniendo constante la kieserita en 3000 g planta⁻¹. La barra oscura representa el rendimiento del testigo sin-fertilización. Las líneas verticales representan el error estándar.

50

Figura 19. Superficie de respuestas significativas ($p < 0.01$) del rendimiento de racimos de palma aceitera (t ha⁻¹) cuando se aplicó 1500 g planta⁻¹ de urea. (a) Incrementando simultáneamente las dosis de superfosfato triple y de kieserita sin aplicación de cloruro de potasio; (b) Incrementando simultáneamente las dosis de superfosfato triple y de kieserita manteniendo constante el cloruro de potasio en 2000 g planta⁻¹; (c) Incrementando simultáneamente las dosis de superfosfato triple y de kieserita manteniendo constante el cloruro de potasio en 4000 g planta⁻¹; (d) Incrementando simultáneamente las dosis de cloruro de potasio y de kieserita sin aplicación de superfosfato triple; (e) Incrementando simultáneamente las dosis de cloruro de potasio y de kieserita, pero manteniendo constante el superfosfato triple en 750 g planta⁻¹; (f) Incrementando simultáneamente las dosis de cloruro de potasio y de kieserita pero manteniendo constante el superfosfato triple en 1500 g planta⁻¹. La barra oscura representa el rendimiento del testigo sin-fertilización. Las líneas verticales representan el error estándar.

51

I. INTRODUCCIÓN

Para los países tropicales, la palma de aceite (*Elaeis guineensis* Jacq) representa una alternativa de excelente perspectiva en el futuro. Este cultivo produce entre cinco y siete veces más aceite que la mayoría de cultivos oleaginosos, con materiales genéticos recientes que hacen la diferencia en rendimiento de aceite cada vez mayor. Además, los problemas de salud atribuidos a las grasas hidrogenadas de origen animal, abren paso al aceite de palma para la fabricación de productos a base de grasa vegetal.

Actualmente, en el mundo se comercializan alrededor de 11 millones de toneladas de aceite de palma. Los principales países exportadores son Malasia, Indonesia y Singapur contribuyendo con el 90% de la oferta mundial. En América los principales países exportadores son Colombia, Ecuador y Costa Rica. En la última década, la superficie cultivada en el mundo se ha incrementado en 50% y los países que han liderado esta expansión son los de América Latina y el Caribe entre los que destacan Guatemala con 300%, República Dominicana con 200%, Perú con 90% y Ecuador con 65% (FAO, 2002).

En la actualidad, el Perú cuenta con 12,000 ha en producción. Sin embargo, esta es mínima comparada a la demanda interna abastecida por aceite importado. En nuestro país, la demanda de aceite vegetal se ha incrementado de 29 a 34% entre 1990 y 1999 (Ministerio de Agricultura-Oficina de Información Geográfica, 2002). Se han identificado zonas potenciales de producción de palma aceitera en la selva peruana, en base a su condición climática (latitud, altitud, precipitación, radiación, humedad, vientos, entre otros) ubicadas en los departamentos de Loreto, Amazonas, San Martín, Ucayali, Huánuco y Cuzco con una superficie estimada de 1'405,000 ha (Ministerio de Agricultura-Unidad de Desarrollo de la Amazonía, 2000). Sin embargo la caracterización físico química de los suelos ubicados en estas áreas potenciales son escasas o nulas. Por otro lado la alta demanda nutricional de la palma aceitera obliga a reponer los principales elementos de suelo, puesto que a largo plazo ocasiona problemas de disponibilidad de estos en el suelo. En tal sentido, es necesario documentar el uso eficiente de este recurso, a fin de generar alternativas integrales para el desarrollo de la industria aceitera en el país.

El presente trabajo, tuvo como objetivos: (1) determinar los cambios en las características químicas de un suelo aluvial del Huallaga luego de quince años de explotación de palma aceitera con un promedio de aplicación de 2 300 t ha⁻¹ de fertilizantes/año, cuyo rendimiento promedio alcanzó niveles de 22 t ha⁻¹ de racimos de fruta y (2) Determinar la variabilidad espacial de las principales propiedades físicas y químicas del suelo. (3) Analizar la variabilidad espacial de las características del suelo aplicando métodos de geo-estadística.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1 Generalidades del cultivo de palma aceitera: La palma aceitera es una planta perenne, cultivada por su alta productividad de aceite. La especie tiene tres variedades (var.): *Dura*, *Tenera* y *Pisifera*. La var. *Tenera* es la que se utiliza comercialmente para la extracción del aceite y proviene del cruce entre *Dura* y *Pisifera*. La taxonomía botánica de la palma aceitera se resume como: División: *Fanerógama*, Tipo: *Angiosperma*, Clase: *Monocotiledónea*, Orden: *Palmales*, Familia: *Palmaceae*, Tribu: *Cocoinea* y Género: *Elaeis* (*guineensis* y *oleífera*). La palma africana es una especie monoica que produce inflorescencias masculinas y femeninas por separado (ciclos femeninos y masculinos alternos de manera que no ocurren autofecundaciones). Con el concurso de polen de otras plantas vecinas, una inflorescencia femenina se convierte en un racimo con frutos maduros de color rojo después de cinco meses a partir de la apertura de las flores. El número de racimos y de hojas producidas por palma por año es variable de acuerdo a la edad y a los factores genéticos. A los cinco años se espera que una palma produzca catorce racimos por año con un peso promedio de 7 kg racimo⁻¹. A los ocho años, se estima que el número de racimos producidos sea ocho con un peso promedio de 22 kg cada uno (Hartley, 1977).

El árbol de palma, es nativo del Africa tropical del oeste. La fruta crece en manojos y consiste esencialmente en una capa externa suave que al madurar es de color naranja rojiza y una capa fibrosa que cubre la semilla que a su vez está integrada por una cubierta y un núcleo que contiene el aceite de palma. La fruta da origen a dos clases de aceite, el aceite que proviene del núcleo carnoso de la cubierta y el que proviene de la semilla (Hartley, 1977).

La var. *Tenera*, produce alrededor de 24 a 30 hojas planta⁻¹ y 12 racimos año⁻¹ planta⁻¹ con un peso promedio por racimo de 20 a 30 kg (equivalente a 25-30 t ha⁻¹ año⁻¹). La semilla del fruto equivale al 5 u 8% del peso del fruto (equivalente a 1.0-1.6 t ha⁻¹). Otras cualidades de esta variedad es que produce 0.50 t ha⁻¹ de aceite de almendra, 0.45 t ha⁻¹ de torta de almendra, 5 a 8 t ha⁻¹ año⁻¹ de aceite, 13% del peso de racimo corresponde a fibras, 22% del peso del racimo es raquis o estípe. La plantación de palma es económicamente viable por 25 años (Hartley, 1977).

El aceite de palma, es un alimento natural que se consume desde hace 5,000 años. Se refina sin necesidad de disolventes químicos lo que reduce el riesgo de contaminación por residuos. Contiene iguales proporciones de ácidos grasos saturado y no saturado. Del total de aceite, alrededor del 40% es ácido oleico (no monosaturado), 10% es ácido linoléico (no polisaturado), 44% es ácido palmítico (saturado) y 5% es ácido esteárico (saturado). Este aceite es una fuente natural de vitamina E, tocoferoles y tocotrienoles y, sin refinar, también es una fuente importante de vitamina A (Huan, 1989).

2.2 Clima y suelos y necesidades de fertilizantes

2.2.1 Clima: La palmera aceitera, es un cultivo tropical que para la producción óptima de aceite requiere: temperatura elevada constante de 24-28°C (con media mínima >18°C y máxima <32°C); precipitaciones bien distribuidas de 1,500 a 3,000 mm año⁻¹, sin períodos secos prolongados (3 meses como máximo); elevada humedad atmosférica relativa (media mensual >75%) y por lo menos 1,500 horas de sol, bien distribuidas a través del año. Por sus necesidades de temperatura, las altitudes mayores a 500-700 msnm no son, en general, apropiadas para el cultivo. Para una producción satisfactoria de la palmera oleaginosa, el clima es un factor de mayor importancia; pero, en áreas marginales la calidad del suelo es la determinante decisiva (Werkhoven, 1967).

2.2.2 Suelo: Las características físicas y químicas del suelo influyen en el desarrollo de la palma de aceite, particularmente en zonas climáticas marginales. Al igual que el cocotero, la palma de aceite es favorecida por suelos profundos, sueltos y con buen drenaje. Un nivel freático superficial limita el desarrollo de las raíces y la nutrición. En general, las buenas características físicas de textura y estructura, son preferibles antes que el nivel de fertilidad, pues éste puede corregirse con fertilización mineral. La palma de aceite resiste niveles bajos de acidez hasta pH 4. Una palma de aceite adulta elabora cada hasta 500 kg de materia vegetal: 230 kg de racimos, 150 kg de hojas y 20 kg de inflorescencias masculinas. A este material se debe agregar el que proviene del tronco y a las raíces. De aquí se deducen las necesidades nutricionales de la palma que, en importancia, son: potasio, nitrógeno, calcio, magnesio, fósforo y boro (von Uexküll and Fairhurst, 1991).

Los suelos arenosos gruesos y los pesados mal drenados, son inadecuados para el cultivo. Los suelos turbosos con poca profundidad, sobre una capa friable de arcilla pueden ser apropiados a condición de ser drenados. Sin embargo, los suelos turbosos profundos con una capa superior suelta no pueden proporcionar suficiente anclaje para el sistema radicular de la palmera (Werkhoven, 1967).

Con respecto a la acidez del suelo, y contrario a varias afirmaciones, el pH óptimo oscila entre 5.5 y 6.0; en muchas zonas, la palmera se desarrolla en suelos aún más ácidos con pH entre 4 – 6 (Werkhoven, 1967).

Cuadro 1. Interpretación del contenido de nutrientes en el suelo para el cultivo de palma aceitera

Propiedad	Interpretación			
	Muy bajo	Bajo	Moderado	Alto
Ph	<3.5	4.0	4.2	5.5
C orgánico (%)	<0.8	1.2	1.5	2.5
N total (%)	<0.08	0.12	0.15	0.25
P total (mg kg ⁻¹)	<120	200	250	400
P disponible (mg kg ⁻¹)	<8	15	20	25
K intercambiable (cmol kg ⁻¹)	<0.08	0.20	0.25	0.30
Mg intercambiable (cmol kg ⁻¹)	<0.08	0.20	0.25	0.30
CICE (cmol kg ⁻¹)	<6	12	15	18
Respuesta al fertilizante	Definitivo	Probable	Posible	Posible

mg kg⁻¹ = ppm; cmol kg⁻¹ = meq 100-g⁻¹; CICE=capacidad de intercambio catiónico efectiva

Fuente: von Uexküll and Fairhurst (1991)

2.3 Nutrición de la palmera de aceite:

Las considerables cantidades de nutrientes extraídos por la cosecha bajo diversas condiciones de las plantaciones adultas se muestran en el Cuadro 2.

Aunque las cifras dadas sobre los nutrientes inmovilizados por la palmera varían ampliamente, manifiestan claramente lo siguiente: (a) la mayor parte de los nutrientes acumulados en el tronco es retirada del campo con los racimos; (b) las cantidades extraídas por las hojas y raíces son relativamente pequeñas; (c) el nitrógeno (N) y el potasio (K) son requeridos en grandes cantidades por el tronco y los racimos; (d) la mayor parte de la gran cantidad requerida de potasio es retirada con los racimos, perdiéndose definitivamente del suelo, aproximadamente la mitad del total de N y P asimilado se pierde con los racimos; la pérdida de magnesio (Mg) y calcio (Ca) con los mismos es pequeña en comparación con la asimilación de estos nutrientes. (Chan, 1982a, Chan 1982b)

Cuadro 2. Nutrientes inmovilizados anualmente en los racimos de palma aceitera (kg ha⁻¹).

Area	Rendimiento estimado de racimos (t ha ⁻¹)	N	P	K	Mg	Ca
Congo	13	38	6	39	5	6
Nigeria	11	29	6	33	4	5
Costa de Marfil	15	70	10	70	10	10
Malaya	15	39	6	86	--	--
Sumatra	15	90	17	112	--	28
Sumatra	20-25	100	22	125	--	--

Fuente: Resumido de Werkhoven (1967).

De acuerdo a los datos de Rees and Tinker (1963) y Tinker and Smilde (1963) referentes a la producción de materia seca y a los contenidos de nutrientes en raíces, penacho, tronco y racimos en palmeras cultivadas en Nigeria y de varias edades, muestran: (a) un incremento de la extracción NPK, realizada por los racimos en edades avanzadas, (b) un incremento lento del potasio acumulado en la palmera y (c) una marcada acumulación de Ca y Mg en el tronco. Debido a que las condiciones de cultivo y los niveles de rendimiento son variados (desde 12 a 30 t ha⁻¹) las cifras suministradas no pueden ser generalizadas. Sin embargo, es

obvio notar que las pérdidas de N, P y especialmente de K, son elevadas a causa de la extracción realizada por los racimos.

El suministro natural de nutrientes por parte de cualquier suelo es limitado. De ahí, la necesidad de aplicar fertilizantes adicionalmente. Las cifras de las cantidades de nutrientes retirados del terreno por las cosechas o la extracción de nutrientes por las mismas plantas, no proveen una idea directa del suministro de nutrientes requeridos. Para mantener una buena condición nutricional en las plantaciones de palma es necesario contar con: resultados de experimentos de fertilización, estudios fisiológicos del cultivo, análisis del suelo, análisis foliares, nutrientes perdidos por lixiviación, deficiencias que se observan a simple vista, profundidad del suelo, materia orgánica, lluvia anual y distribución y energía solar (Ng, 1970; von Uexküll and Fairhurst, 1991).

La palma de aceite crece en muchas clases de suelo. Sin embargo, un suelo limoso profundo, rico en humus y nutrientes, con buena estructura, consistencia friable suelta y carente de estratos compactos hasta 1.5 m de profundidad, resulta ser el tipo de suelo más favorable para la producción óptima de aceite. El drenaje debe asegurar la aireación, en tanto que el suelo debe ser capaz de retener humedad. El crecimiento será afectado en forma adversa por la presencia de una capa freática elevada y permanente (Werkhoven, 1967).

En el Cuadro 3, se resume los valores deficientes, óptimos y en exceso de macronutrientes y micronutrientes determinados en el análisis foliar. Actualmente las recomendaciones de fertilización se basan en estos valores. Asimismo estos valores sirven para determinar rápidamente las necesidades de fertilizantes en áreas de mayor extensión. Basándose en suficiente trabajo de campo, el análisis foliar puede ser empleado como una excelente guía tanto cuantitativa como cualitativa para determinar las necesidades de fertilizantes. No obstante, muchos factores pueden limitar las posibilidades para su uso apropiado (von Uexküll and Fairhurst, 1991).

De los datos anteriores es obvio que la palma de aceite necesita suelos con alto nivel de fertilidad. Mientras el nitrógeno puede ser parcialmente suplido mediante el uso de coberturas especialmente de fabaceas (Agamuthu *et al.*, 1981), la alta demanda de K tiene que ser cubierta por fertilizantes, excepto en

suelos con altas reservas de K (Hew *et al.*, 1973). Desde el punto de vista de las necesidades de nutrientes para un cultivo de palma aceitera de varios estados de crecimiento, las plantas muestran un rápido incremento de los principales nutrientes, particularmente K y N desde el segundo año después del trasplante. Estos niveles de absorción se mantienen hasta después del quinto al sexto año de crecimiento. Por lo tanto, es de importancia crítica proveer adecuada nutrición a través de un apropiado manejo de fertilizantes y cultivos de cobertura durante las fases iniciales de crecimiento de las plantas, lo que provocará cosechas más tempranas e incrementos rápidos de la producción haciendo posible un retorno más rápido de la inversión.

Si las necesidades de los nutrientes se comparan a la habilidad de los suelos para suplir estos nutrientes, se puede determinar los requerimientos de fertilizantes que den niveles de producción económica (Hew and Ng, 1968; Ng, 1977). Suelos con bajos contenidos de K, mayormente Ultisoles y Oxisoles, requieren aplicaciones más tempranas de fertilizantes potásicos respecto aquellos suelos que tienen altas reservas de K. El magnesio es también importante, particularmente en suelos anegados y lixiviados (Tan, 1979). Para el manejo apropiado de nutrientes es necesario el balance entre las entradas y las pérdidas de los diferentes nutrientes. También es particularmente importante considerar las tasas de N:K y K:Mg. En suelos arenosos con bajos contenidos de K, un buen balance de fertilizantes a base de N y K mejorará los rendimientos de palmas maduras (Ollagnier and Ochs, 1973). Un incremento en el contenido de N y K sin una adecuada aplicación de Mg en suelos con bajos estatus de Mg puede provocar el desarrollo de síntomas de deficiencia en plantas jóvenes y reducción del rendimiento.

Utilizando material de siembra mejorado producido en cultivo de tejido y buenas prácticas de manejo, el promedio de rendimiento se ha incrementado desde 25 a 30 t ha⁻¹. Al mismo tiempo, el replante de plántones jóvenes dentro de plantaciones viejas ha intensificado el rol crítico de los micronutrientes. Los árboles inmaduros pueden ser fuertemente dañados por las deficiencias de boro (B) y cobre (Cu) (Rajaratnam 1973a). La deficiencia de B es muy común debido a que el B disponible en el suelo ha sido absorbido por las plantas adultas, mientras que las aplicaciones de fertilizantes fosfatados también suprimen la absorción de

B por la palma (Rajaratnam, 1973b). Como una medida preventiva, el manejo de fertilizantes para replantes debe incluir la aplicación de aproximadamente 100 a 150 g de fertilizante a base de boro dos a tres veces al año desde el segundo año después de la siembra (Ng, 1977).

Los altos rendimientos de palma aceitera producen grandes cantidades de restos industriales, la aplicación a campo de estos residuos ricos en nutrientes se ha ensayado a gran escala (Wood, 1977; Wood *et al.*, 1979; Chiew and Rahman, 2002) y se encontró que es un eficiente medio de reciclaje de nutrientes.

Cuadro 3. Interpretación del contenido de nutrientes en las hojas de palma aceitera (>6 años), hoja No. 17¹.

Elemento	Deficiencia	Optimo	Exceso
N (%)	< 2.30	2.4 – 2.8	> 3.0
P (%)	< 0.14	0.15 – 0.19	> 0.25
K (%)	< 0.75	0.9 – 1.2	> 1.6
Mg (%)	< 0.20	0.25 – 0.40	> 0.7
Ca (%)	< 0.25	0.5 – 0.75	> 1.0
S (%)	< 0.20	0.25 – 0.40	> 0.6
Cl (%)	< 0.25	0.50 – 0.70	> 1.0
B (mg kg ⁻¹) ²	< 8	15 – 25	> 40
Cu (mg kg ⁻¹)	< 3	5 – 8	> 15
Zn (mg kg ⁻¹)	< 10	12 – 18	> 80

¹contada a partir de la hoja más joven (primera) completamente desarrollada, la 17^a es la segunda hoja debajo de la primera (filotaxia 1 – 9 – 17 – 25).

²mg kg⁻¹ = ppm

Fuente: von Uexküll and Fairhurst (1991)

2.4 Variabilidad espacial de los suelos: Existen varios aspectos asociados a los problemas con la heterogeneidad espacial o variabilidad en los sistemas agrícolas. Por un lado, la variabilidad del campo se constituye como el principal

obstáculo para identificar parámetros, impactos o relaciones entre los componentes del sistema. La caracterización de la variabilidad espacial de los atributos del suelo es esencial para lograr una mejor comprensión del complejo de relaciones entre las propiedades del suelo y los factores medioambientales. También, un modelo de dependencia espacial entre datos de suelo, puede ser utilizado en el futuro para estimar atributos en zonas no muestreadas, por ejemplo para una mejor recomendación de fertilizantes (Goovaerts, 1998). La detección de correlación espacial entre la distribución del sistema radicular de las plantas y las propiedades del suelo puede ser un primer paso en el análisis de las interacciones suelo-planta (Mekonnen *et al.*, 1999). Las propiedades del suelo y la disponibilidad de nutrientes en el suelo varían dentro de un campo a tal forma que las aplicaciones de fertilizantes pueden ocasionar áreas sobrefertilizadas o subfertilizadas. Por lo tanto, es necesaria una mejor comprensión de la variabilidad espacial del contenido de nutrientes en el suelo como base para el manejo de la fertilidad del mismo y para la aplicación de fertilizantes (Hammond, 1994; Franzen *et al.*, 1996). A menudo, la variabilidad de las propiedades del suelo dentro de un campo puede ser caracterizada a través de métodos estadísticos tradicionales; sin embargo, estos métodos asumen que la variación está distribuida al azar dentro de las unidades de muestreo. La variabilidad del suelo es el resultado de muchos procesos que actúan e interactúan continuamente entre sí a escala temporal y espacial. Asimismo, a menudo las propiedades del suelo son espacialmente dependientes (Parkin, 1993; Cambardella *et al.*, 1994; Huang and Jin, 2002). Uno de los métodos para la manipulación de datos dependientes espacialmente es la utilización de la teoría de las variables regionalizadas (Matheron, 1963). Los métodos geoestadísticos basados en variables regionalizadas son más útiles para describir y comprender la variabilidad espacial de variables registradas comparadas con los métodos estadísticos tradicionales (Bregt *et al.*, 1992).

La geoestadística provee herramientas útiles para el análisis espacial, la creación de mapas optimizados y para la simulación de procesos espaciales. Por ejemplo, la geoestadística puede ser utilizada para obtener estimados de la disponibilidad de fósforo en el suelo bajo un cultivo intensivo con un patrón complejo de aplicación de fertilizantes y absorción de nutrientes por las plantas.

Cuando se generan mapas de las propiedades químicas o físicas de un campo, la autocorrelación que da información de la similitud de valores a partir de muestras vecinas e incremento en la disimilitud de valores con incrementos de la distancia entre las muestras, puede ser utilizada para generar esquemas de muestreos óptimos de acuerdo a los requerimientos del experimento, disponibilidad económica o exactitud local predefinida (Oliver, 1992; Webster and Burgess, 1984).

La idea principal detrás de la geoestadística es la observación en campo de valores de una variable que son más parecidos uno al otro mientras más se reduce la distancia de muestreo. Con incrementos de la distancia, la influencia espacial de las muestras vecinas es más pequeña, y sobre un cierto límite, denominado rango o alcance (a) las variables son independientes en un sentido estadístico. Un componente básico del análisis geoestadístico es el semivariograma (Figura 1) cuya función matemática describe como dos puntos de muestreo se vuelven más diferentes con el incremento de la distancia espacial entre ellos (Kitanidis, 1997) (Coe *et al.*, 2003).

Las medidas son tratadas como la realización de un proceso espacial completamente al azar, lo que significa que las características del patrón o proceso al azar puede ser derivado desde un solo grupo de datos espaciales. Por ejemplo, una sola medida del contenido de fósforo en el suelo en varias posiciones de muestreo en un campo, es suficiente para describir el patrón al azar de la distribución de fósforo en el campo. La otra asunción de la teoría geoestadística es intrínsecamente estacionaria lo cual significa que para cualquier par de puntos muestreados en el área, la diferencia en el valor de la medida (e.g. contenido de fósforo en el suelo) depende solo de la distancia entre los dos puntos (distancia de separación) independientemente del lugar donde se colectó la muestra dentro del campo. Esta asunción, a menudo es problemática, especialmente en áreas con una gradiente pronunciada o abruptos cambios de las propiedades del suelo (Coe *et al.*, 2003).

El semivariograma describe la estructura de la autocorrelación de la variable medida en una respectiva área. El estudio de la geoestadística involucra los siguientes pasos (Kitanidis, 1997): (i) diseño de los cuadrantes de muestreo;

(ii) colección de datos; (iii) análisis de la estructura espacial (determinación de semivariogramas empíricos); (iv) selección de un apropiado modelo teórico del semivariograma; (v) interpolación de los cuadrantes mediante el mejor estimador y (vi) optimización interactiva del modelo de semivariograma utilizando técnicas de validación cruzada.

El diseño del cuadrante de muestreo (dimensión, tamaño del cuadrante, espaciamiento regular o irregular) depende de los requerimientos de exactitud específicos y de la estructura espacial del área a muestrear. Un cuadrante unidimensional (transectos) se utiliza para estructuras lineales tales como gradientes entre árboles sembrados linealmente y campos adyacentes. Cuadrantes bi y tridimensionales se utilizan para diseñar mapas, por ejemplo mapas de distribución de nutrientes en un campo, o para la determinación de parámetros de campo para procesos de simulación tales como el transporte de nutrientes y contaminantes en el suelo (Kitanidis, 1997).

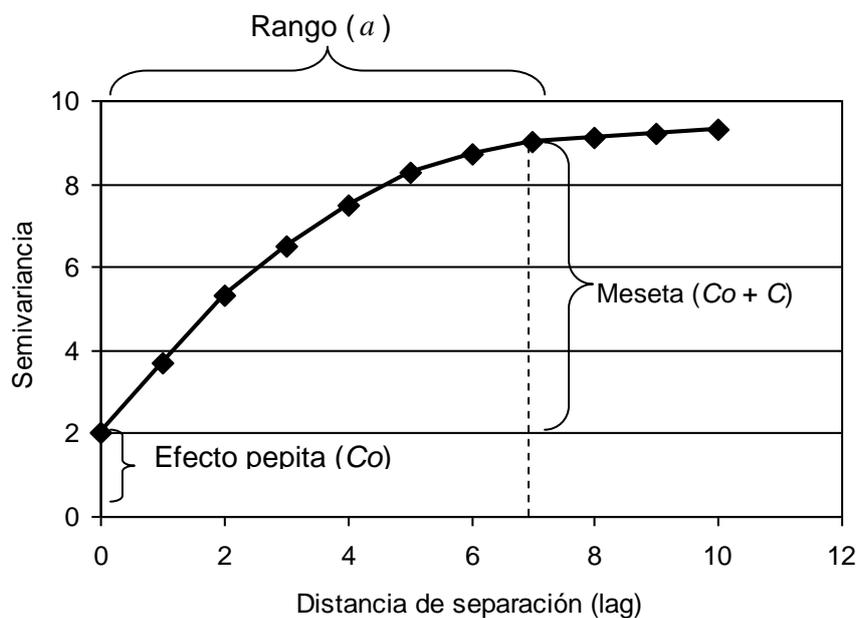


Figura 1. Semivariograma esquemático con una variancia en el origen o efecto pepita 'Nugget effect' de 2, un meseta de 7 y un rango de 7 (Coe et al., 2003).

La fórmula matemática de la semivariograma $\gamma(\vec{h})$ está dada por:

$$\gamma(\vec{h}) = \frac{1}{2N(\vec{h})} \sum_{i=1}^{N(\vec{h})} \left[(z(\vec{x}_i) - z(\vec{x}_i + \vec{h}))^2 \right] \dots \dots \dots (1)$$

Donde $z(\vec{x})$ denota la medida a la ubicación \vec{x} , y N es el número de pares con una distancia de \vec{h} . La flecha indica vectores. En palabras simples, el semivariograma otorga para cada distancia h entre dos puntos de datos, una diferencia de media cuadrada, obtenida al promediar todos los pares de datos con esta distancia en el grupo de datos. Para un pequeño h (muestras colectadas muy cerca uno del otro) esta diferencia será relativamente pequeña, y para mayores valores de h será más grande. El uso de vectores en la fórmula indica que el semivariograma puede no ser el mismo en todas direcciones; es decir puede ser anisotrópico (Kitanidis, 1997).

Como se ilustra en la Figura 1, los típicos semivariogramas se caracterizan por: (i) un corto rango de variabilidad, la variancia en el origen (C_0), la cual es determinada por la distancia de muestreo más cercana en el cuadrante y por lo tanto, en cierta extensión, es la discontinuidad en el origen; (ii) una asíntota que es igual a la variancia residual de la variable ($C_0 + C$), e.g. la variancia entre puntos de muestreo que son completamente independientes uno del otro a la escala de estudio; y (iii) un máximo valor de distancia de separación que caracteriza el rango de influencia espacial y por lo tanto se denomina rango (a). Los puntos que se encuentran más allá del rango son independientes. La meseta es la diferencia entre la variancia residual y la variancia en el origen. Para cuadrantes irregulares y condiciones anisotrópicas, las diferencias se agrupan en varias distancias y clases de ángulos (Kitanidis, 1997).

La semivariograma experimental es la base para la selección de un modelo teórico el cual se utiliza para el análisis de la estructura espacial de la variable bajo estudio. Los modelos de los semivariogramas teóricos son funciones matemáticas que deben ajustar a un semivariograma experimental tanto como sea posible. No todas las funciones que pueden ajustar los datos pueden ser utilizados como modelos de semivariogramas. Un primer estimado de los parámetros de un modelo de semivariograma puede obtenerse mediante una

aproximación por mínimos cuadrados utilizando datos empíricos del semivariograma experimental (Goovaerts, 1998).

En un subsiguiente procedimiento, utilizando un grupo de diferentes técnicas de krigeado 'kriging' se procede a optimizar el semivariograma y producir los mejores datos estimados posibles. Un criterio para verificar la calidad de la estimación es obtenida mediante un procedimiento de validación cruzada donde cada punto de medida es estimada desde los puntos vecinos y los valores estimados se comparan con los valores verdaderos (Kitanidis, 1997; Isaaks and Srivastava, 1989).

El krigeado, por definición minimiza la estimación de la variancia entre los datos medidos y los estimados. Existen diferentes técnicas de krigeado, el más común el krigeado en puntos ('point kriging) un estimador lineal imparcial de la variable bajo estudio; se aplica comúnmente en agricultura y medio ambiente. Por ejemplo, mapas de textura de suelo o pH pueden ser generados con esta técnica. Otras técnicas especiales de krigeado es la tendencia ('trends') especialmente útiles para análisis espacial de suelos con gradientes, cambios geológicos, condiciones climáticas o historiales de uso diferentes. El krigeado por bloques ('block kriging') se utiliza para estimar un valor que represente un volumen alrededor a un punto determinado; por ejemplo, muchas veces se requiere estimar la disponibilidad de nutrientes o agua disponible en un volumen de suelo. El co-krigeado ('Co-kriging'), se utiliza para medir la autocorrelación o intercorrelación entre dos variables o propiedades medidas. Tomando en consideración el tipo de relación entre ambas variables, se tendrá un mejor estimado que cuando se realiza el krigeado de cada variable por separado. Indicador del krigeado ('Indicator Kriging'), es una técnica particularmente útil en problemas de decisiones medioambientales (Kitanidis, 1997; Coe *et al.*, 2003).

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 Características del sitio en estudio

Ubicación: El estudio se realizó en la región San Martín, provincia de Tocache, distrito de Uchiza sobre una superficie de 4623 ha de plantación establecida de palma aceitera, la misma que fue instalada en 1982 por la empresa privada Palmas del Espino S.A. (Figura 2).

Clima: Las condiciones climáticas indican una pluviometría entre 2,500 y 3,500 mm año⁻¹, en promedio se tiene una precipitación mensual de 350 mm en los meses lluviosos (noviembre - marzo) y 110 mm en los meses menos lluviosos (junio – setiembre) no existen períodos secos. A pesar de la pluviometría, la insolación alcanza un nivel satisfactorio de 1,632 horas año⁻¹, la temperatura máxima anual en promedio es de 30.4 °C y la mínima es de 19.1 °C. El régimen de temperatura del suelo es isohipertérmico y el régimen de humedad del suelo es údico.

Hidrografía: La zona queda dividida por un sistema hidrográfico muy abundante cuya orientación general es de sur a norte, distinguiendo tres categorías de ríos: los caños de 1 a 2 m de ancho, las quebradas de 3 a 6 m de ancho y los ríos Porongo y Espino de 10 a 20 m de ancho.

Topografía y morfología: El relieve esta formado en los aluviones del río Huallaga y de sus afluentes, la superficie plana no ofrece importantes movimientos topográficos, el declive es de 7%, todos los ríos tienen márgenes francas sin orilla pantanosa, la morfología del terreno indica algunos tipos de suelos sin erosión, con erosión mediana a fuerte y con erosión muy fuerte.

3.2 Muestreo general del campo, perfiles y experimento factorial (CP1)

3.2.1 Muestreo de campo. El total de la plantación está dividida en cuadrantes o parcelas de 250 m x 1000 m equivalente a 25 ha cada una, de acuerdo a un diseño establecido por el CIRAD (Olivin, 1980). La plantación cuenta con 196 parcelas. El muestreo se diseñó en función de la magnitud y la uniformidad de cada parcela de 25 ha; en la parte más larga la parcela tiene 130

hileras y a lo ancho posee 27 plantas, recorriendo de sur a norte. En cada parcela se tomaron tres muestras a nivel superficial (prof. 0-20 cm) y cada muestra estuvo compuesta de quince sub-muestras. Con la finalidad de poder hacer un seguimiento se determinó que las líneas de muestreo sean la 30, 60 y la 90, de esta forma se ingresó por la fila 30 y se avanzó hasta la quinta planta, se tomaron sub-muestras al costado de cinco plantas sucesivas, haciendo lo mismo con las plantas del lado izquierdo y derecho hasta completar las 15 sub-muestras. Luego se procedió de igual forma con la hilera 60, pero aquí las sub-muestras se empezaron a tomar a partir de la décima planta. En la hilera 90 se tomaron las sub-muestras a partir de la planta 15. Las muestras sucesivas en las demás parcelas se tomaron de la misma forma, de tal modo que al hacer una visión panorámica se tenga establecida un muestreo global en “zigzag” que recorre toda la plantación. Como se puede observar cada sub-muestra constó de 15 plantas que hacen un área de muestreo de 1050 m² por muestra, si consideramos las otras dos sub-muestras entonces tenemos 3150 m² de área de muestreo que representan a la parcela de 25 ha. En algunas parcelas, también se tomaron muestras a nivel subsuperficial (prof. 20-40 cm). En total se colectaron 196 muestras superficiales y 93 subsuperficiales. Las coordenadas de cada punto de muestreo se ubicaron en sistema bidimensional (XY) en dirección este a oeste (eje X) espaciados a 1000 m y en dirección sur a norte (eje Y) espaciados a 250 m (Figura 2).

3.2.2 Perfiles. Para la caracterización de perfiles se establecieron calicatas con la ayuda de un mapa morfológico publicado por Olivin (1980). Para efectos de la caracterización actual, luego de recorrer el campo se asociaron éstas unidades cartográficas en tres grupos: (i) suelos Tipo 0 (sin erosionar) + Tipo 1 (leve erosión) 48% lectura y se establecieron 11 perfiles; (ii) suelos Tipo 2 (erosión mediana) + Tipo 3 (erosión muy fuerte) 42% lectura con 12 perfiles y (iii) suelos Tipo 4 (Aguajal, Bajéal, Neajal) 10% lectura con 3 perfiles, haciendo un total de 26 perfiles para toda la plantación con un índice de una calicata por cada 178 ha. La lectura y muestreo de los perfiles se realizaron de acuerdo a las normas de caracterización de perfiles de la taxonomía de suelos empleando en lo posible todos los criterios de morfogénesis, pedogénesis, caracterización físico química y las herramientas como fichas de diagnóstico, tabla Munsell, cuchillos, picotas,

palas, bolsas, cámara fotográfica, entre otras (Soil Survey Staff, 1999). La empresa Palma del Espino S.A. registra anualmente sus rendimientos de racimos de palma fresca ($t\ ha^{-1}$) por parcela, estos datos fueron utilizados para interpolar los rendimientos en todo el campo.

3.2.3 Experimento de fertilización. En 1982, el Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD) instaló un experimento factorial de fósforo (P), potasio (K) y magnesio (Mg) cada uno a tres niveles subdividido en dos niveles de nitrógeno (N) dando lugar a 27 parcelas principales y 54 sub-parcelas de fertilización combinada (Cuadro 4). El experimento tuvo un área total de 75 ha. Las parcelas en el experimento factorial cuentan con 24 plantas por parcela neta, subdividida en dos sub-parcelas de 12 plantas cada una. Cada sub-parcela esta organizada en dos filas de seis plantas numeradas del 1 al 12 en las que se registró el rendimiento por planta y luego inferido a $t\ ha^{-1}$ (asumiendo una densidad de 143 plantas ha^{-1}). Las repeticiones (r) se organizaron de la siguiente manera: r1 (plantas 1, 3 y 5), r2 (plantas 2, 4 y 6), r3 (plantas 7, 8 y 9). Las plantas 10, 11 y 12 actuaron como alternativas debido a que había plantas muertas y/o plantas resembradas. En el Cuadro 5, se muestra los detalles de los tratamientos.

Cuadro 4. Tratamientos establecidos en el experimento factorial CP1.

Elemento	N	P	K	Mg
Fertilizante	Urea	Superfosfato triple de calcio	Cloruro de potasio	Kieserita
Nutrientes	N	P ₂ O ₅ y CaO	K ₂ O	MgO
Contenido, %	46	46 y 20	60	27
	0	0	0	0
Dosis, g planta ⁻¹	1,500	750 1,500	2,000 4,000	1,500 3,000

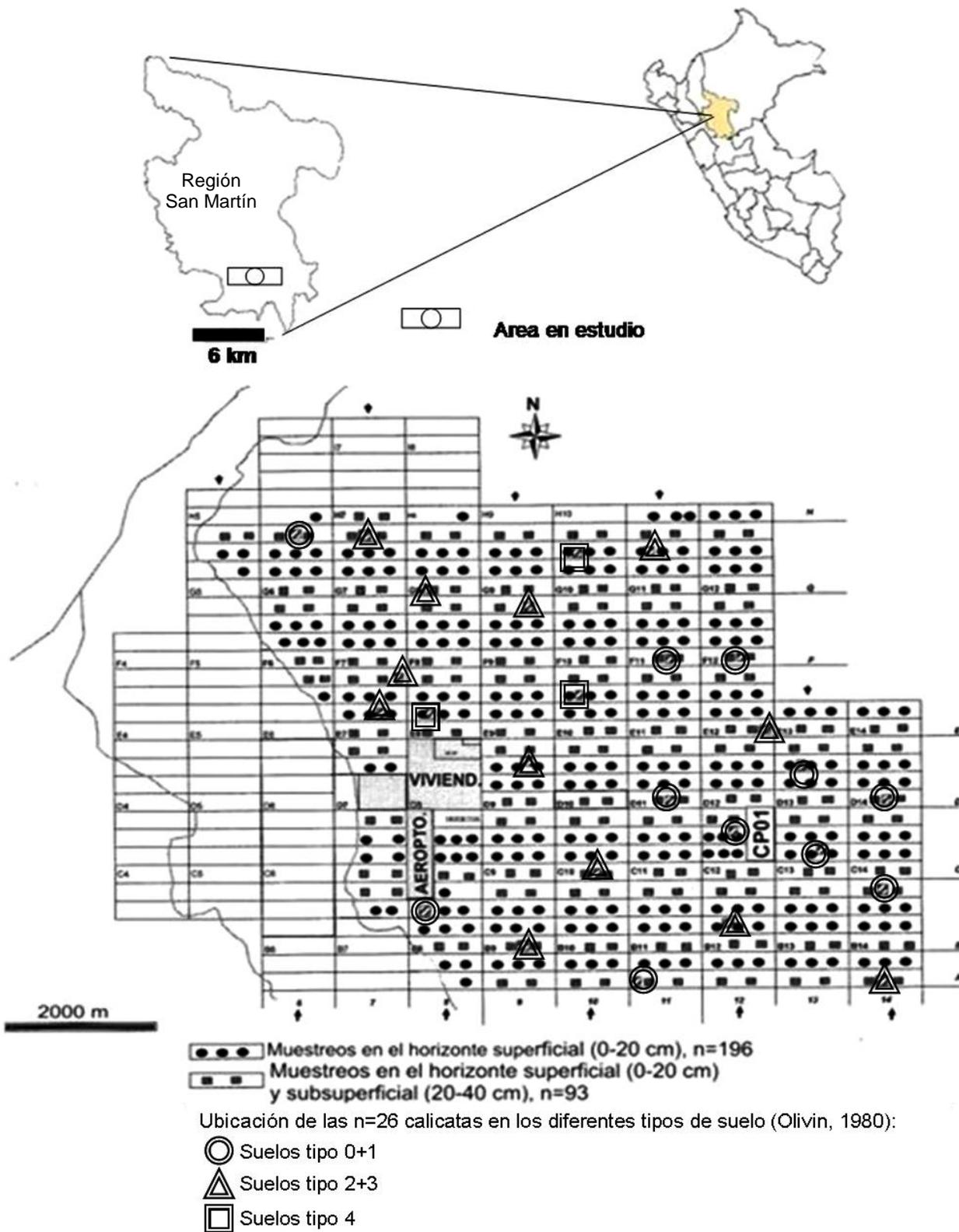


Figura 2. Localización del área en estudio dentro de la región San Martín. Y detalles del muestreo dentro de área en estudio.

3.3. Análisis de suelos.

Todas las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Análisis de Suelos y Plantas de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) donde se realizó el análisis de caracterización completa. En el Cuadro 5, se resume las propiedades físicas y químicas medidas y los métodos de análisis seguidos en cada una de las muestras.

Cuadro 5. Propiedades analizadas en las muestras de suelo.

Propiedad	Método
Físicas	
Textura (contenido de Ao, Li y Ar), %	Hidrómetro
Químicas	
CIC, meq 100 g ⁻¹	Saturación con CH ₃ -COONH ₄ ,N
Materia orgánica (MO), %	Walkley y Black
Nitrógeno (N), %	Micro-Kjeldahl
Fósforo disponible (P), ppm	Olsen modificado, extracción con NaHCO ₃
Potasio disponible (K), ppm	Extracción con CH ₃ -COONH ₄ ,N
Conductividad eléctrica (CE) mmhos cm ⁻¹	En el extracto de la pasta de saturación, 1:1 suelo:agua.
pH	Potenciómetro en proporción 1:1 suelo:agua
Ca ⁺² , Mg ⁺² , Na ⁺ y K ⁺ cambiables, meq 100 g ⁻¹	Reemplazo con CH ₃ -COONH ₄ ,N y cuantificación en fotometría de absorción atómica.

Fuente: Reverso de hoja de resultados, laboratorio de análisis de suelos y plantas, UNALM

3.4 Métodos estadísticos.

3.4.1 Estadísticas descriptivas. Las variables medidas agrupadas en un conjunto de datos fueron analizadas utilizando métodos estadísticos clásicos para obtener los mínimos, máximos, media, mediana, grado de sesgo (Shapiro and Wilk, 1965) y desviación estándar de cada variable medida en las muestras de suelo tomadas a 0-20 cm (n=196), 20-40 cm (n=93), calicatas (n=26) y en la comparación de contenidos en el suelo de los principales nutrientes entre el año 1980 y 1997 (n=33) (Minitab Inc., 2000). Se realizaron análisis de variancia (one-way ANOVA) (SAS Institute, 2000) para comparar cada variable medida entre las profundidades de muestreo, perfil de las calicatas o entre los años 1980 y 1997. Se utilizó una prueba protegida de diferencia de medias (LSD) con $p < 0.05$ (Cuadros 6, 7 y 8). En el Cuadro 6, la prueba de Shapiro-Wilk revela que todas las

variables fueron significativamente sesgadas ($p < 0.05$) excepto para el contenido de limo y arcilla a las dos profundidades (0-20 y 20-40 cm). En el Cuadro 7, las variables físicas (contenidos de arena, limo y arcilla) y el pH no estuvieron sesgados ($p > 0.05$). En el contenido de nutrientes entre los años 1980 y 1997 (Cuadro 9) el nitrógeno es la única variable no sesgada ($p > 0.05$).

Las variables sesgadas fueron transformadas utilizando logaritmo natural para aproximar a una distribución normal antes de utilizar estos datos en el análisis geoestadístico; luego los datos fueron retransformados mediante la técnica de máxima probabilidad (Haan, 1997).

3.4.2 Análisis geoestadístico. El grado de variabilidad espacial para cada propiedad del suelo medida a nivel superficial (0-20 cm) y subsuperficial (20-40 cm) fue determinado mediante métodos estadísticos utilizando análisis de semivariogramas y kriging (Trangmar *et al.*, 1985; McBratney and Pringle, 1999). Antes de aplicar el análisis geoestadístico, se chequeó la normalidad, tendencia y anisotropía de cada variable utilizando las herramientas del análisis exploratorio de datos (Minitab Inc., 2000).

La principal herramienta de la geoestadística en el análisis de datos de dependencia espacial es el semivariograma. Los semivariogramas de un grupo de datos se calculan a partir de la fórmula:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n_{(h)}} \sum_{i=1}^{n_{(h)}} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \dots \dots \dots (2)$$

Donde $n_{(h)}$ es el número de pares de muestra a cada intervalo de distancia h , $Z(x_i)$ es el valor de la variable Z a una distancia h lejos desde x_i y $\gamma(h)$ es la semivariancia para cada distancia de separación (h).

Los semivariogramas experimentales obtenidos de las variables analizadas fueron mejor descritos por los modelos exponencial, esférico y gaussiano:

$$\text{Exponencial} \begin{cases} h = 0: \gamma(h) = 0 \\ h > 0: \gamma(h) = C_0 + C \left| 1 - e^{-\frac{3h}{a}} \right| \dots \dots \dots (3) \end{cases}$$

$$\text{Esférico} \begin{cases} h = 0: \gamma(h) = 0 \\ 0 < h < a: \gamma(h) = C_0 + C \left| 1.5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right| \dots\dots\dots (4) \\ h \geq a: \gamma(h) = C_0 + C \end{cases}$$

$$\text{Gausiano} \begin{cases} h = 0: \gamma(h) = 0 \\ h > 0: \gamma(h) = C_0 + C \left| 1 - e^{-3 \left(\frac{h}{a} \right)^2} \right| \dots\dots\dots (5) \end{cases}$$

Donde $\gamma(h)$ y h tienen el mismo significado que en la ecuación (2), C_0 es la variancia en el origen también llamado efecto pepita ('nugget effect'), C es la variancia estructural, la meseta ('sill') ($C_0 + C$) nos da información de la variabilidad total del área considerada y a es el parámetro distancia del modelo que define la escala espacial de la variación. En el modelo esférico, el semivariograma llega a un máximo de ($C_0 + C$) y el rango (a) es la distancia al cual el semivariograma alcanza la meseta. La tangente a $h = 0$ puede cruzar la meseta a una distancia de $2a/3$. El modelo exponencial tiene una forma similar al modelo esférico pero tiene una pendiente inicial mas alta, su tangente a $h = 0$ podría cruzar la meseta a una distancia de separación (h) de $a/3$. El modelo Gausiano es utilizado cuando los semivariogramas muestran alta autocorrelación positiva a cortas distancias de separación. La función Gausiana tiene correlaciones cercanas a 1, a cortas distancias (h) y es cóncavo hasta llegar a $h = a/\sqrt{6}$ en ese punto la curva se vuelve lineal. Los semivariogramas fueron calculados en forma anisotrópica e isotrópicamente. Los cálculos anisotrópicos fueron establecidos en cuatro direcciones (0, 45 90 y 135°) con una tolerancia de 22.5° para determinar si la función semivariograma depende de la orientación y dirección del muestreo (en este caso serían anisotrópicos) o no (en este caso isotrópicos). La dirección 0° corresponde a la dirección este – oeste y 90° en dirección norte – sur (Isaaks and Srivastava, 1989).

Para definir las diferentes clases de dependencia espacial de las variables del suelo, se utilizó la tasa entre la semivariancia en el origen y la semivariancia

total o la meseta $[C_0/(C+C_0)]$ (Cambardella *et al.*, 1994). Si la tasa es $\leq 25\%$, la variable fue considerada con dependencia espacial fuerte o fuertemente distribuida en parches; si la tasa varía entre 26 y 75%, la variable fue considerada con dependencia espacial moderada; y si es $> 75\%$ la variable fue considerada con dependencia espacial débil.

Los modelos de los semivariogramas fueron validados mediante validación cruzada (procedimiento de prueba y error) para chequear la validez de los modelos y comparar los valores estimados por los modelos de semivariogramas con los datos reales (Isaaks and Srivastava, 1989).

Después de la validación cruzada, los parámetros de los modelos de semivariogramas descritos anteriormente fueron utilizados para construir mapas de interpolación utilizando el procedimiento de krigado en puntos establecidos en una cuadrícula compuesta de cuadrantes de 1000 m x 250 m de largo por ancho. El krigado en puntos es una técnica óptima de interpolación que realiza estimados no-sesgados de variables regionalizadas en puntos no muestreados utilizando las propiedades estructurales de la semivariograma y el grupo de datos de la muestra. La predicción espacial de los valores de una variable del suelo Z a un punto no muestreado x_0 es estimada por la fórmula:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \dots\dots\dots (6)$$

Donde x denota el grupo de coordenadas espaciales $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, n es el número de muestras vecinas y λ_i denota el grado de importancia asociado con los puntos de muestreo x_i . El valor predicho $Z(x_0)$ a un punto x_0 es un promedio de los valores de Z a n puntos alrededor (Webster, 1996; Goovaerts, 1998; Kravchenko and Bullovk, 1999). El análisis de semivariogramas y krigado fue realizado mediante el programa GS+ para Windows 7.0 (Gamma Design Software, 2005).

3.4.3 Análisis estadístico del experimento CP1. Luego de analizar la homogeneidad de variancia y distribución al azar de los datos de rendimiento de racimos ($t \text{ ha}^{-1}$) del experimento CP1, bajo un diseño de parcelas divididas con arreglo factorial $3^3 \times 2$, se analizaron los rendimientos de cada tratamiento

mediante un apropiado modelo lineal general con el programa estadístico SAS. Se utilizó el procedimiento GLM y una prueba protegida de diferencia de medias (LSD) al no encontrar diferencias significativas bajo el procedimiento GLM, se realizó una prueba de t (TTEST) para encontrar diferencias entre todos los tratamientos obtenidos (53 tratamientos) versus el tratamiento sin fertilización (0-0-0-0 g planta⁻¹ de superfosfato triple, cloruro de potasio, kieserita y urea, respectivamente) (SAS Institute, 2000). Por otro lado, se realizó un análisis de superficie de respuestas de cada parámetro, evaluando la combinación de los diferentes niveles de los factores en estudio, utilizando las pruebas de polinomios ortogonales (Kuehl, 2000).

IV. RESULTADOS

4.1 Parámetros estadísticos de las propiedades químicas y físicas del suelo.

Las estadísticas descriptivas del rendimiento de racimos y de las propiedades físicas y químicas del suelo evaluadas en cada parcela muestran que los datos no están distribuidos al azar; es decir existen datos altamente sesgados ($p < 0.05$) excepto para el contenido de Li y Ar (Cuadro 6). Por otro lado, en la caracterización de las propiedades físicas y químicas mediante perfiles de diagnóstico (Cuadro 7) en todas las profundidades medidas se ha detectado fuertes variaciones en las propiedades químicas; mientras que, las propiedades físicas poseen una distribución aproximadamente normal ($p > 0.05$).

Los valores de pH y contenidos de MO también poseen una distribución al azar. Las estadísticas descriptivas de los contenidos de los principales elementos (N, P, K y Mg) medidos en 1980 y 1997, también muestran una distribución significativamente sesgada ($p < 0.05$); excepto en el contenido de N. El análisis de suelo de las muestras tomadas en cada parcela a dos niveles de profundidad, revela que el pH del suelo y el contenido de Ar son significativamente mayores en la capa subsuperficial. Asimismo, el rango de distribución del pH es 0.2 unidades mayor a nivel subsuperficial y el porcentaje de Ar es 15% superior a este mismo nivel de profundidad. Por el contrario, los contenidos de N, P, K y la conductividad eléctrica son significativamente ($p < 0.05$) mayores en la capa superficial que a nivel subsuperficial; asimismo, el porcentaje de arena es significativamente mayor a nivel superficial. Los niveles de Mg y Li son ligeramente mayores en la subsuperficie, pero estas diferencias no son significativas. El rango del contenido de N, P y K es mayor en la capa superficial (Cuadro 6).

La caracterización de los perfiles, demuestran que el pH se incrementa significativamente ($p < 0.05$) a medida que la profundidad del suelo se incrementa; sin embargo, el rango de distribución del pH es menor a mayor profundidad. Por el contrario el contenido promedio y la variación de MO y K se reducen significativamente a mayores profundidades del suelo. Las otras propiedades físicas y químicas evaluadas no muestran diferencias significativas dentro del perfil del suelo; sin embargo, el rango de distribución del contenido Mg a la

máxima profundidad medida (40 - ≤ 90 cm) fue 4 y 3 veces mayor que en la superficie y en la subsuperficie, respectivamente (Cuadro 7).

Comparando los contenidos de N, P, K y Mg medidos en 1980 y 1997, excepto por el N, los demás elementos muestran un significativo incremento ($p < 0.05$). El nivel del P se incrementó en 172% mientras que el K y el Mg en 72 y 67%, respectivamente; por el contrario el N se redujo en 100%. En cuanto a la variación en el contenido de nutrientes, en 1980 la variación del N fue 4 veces mayor que en 1997 y las variaciones en los contenidos de P, K y Mg fueron semejantes en ambos periodos evaluados (Cuadro 8).

4.2 Análisis de la estructura espacial de las propiedades del suelo.

Los semivariogramas anisotrópicos no mostraron ninguna diferencia en la dependencia espacial basada en la dirección (datos no mostrados); por esta razón, se eligió los semivariogramas isotrópicos. Los semivariogramas resultantes indican la existencia de moderada a fuerte dependencia espacial para todas las propiedades físicas y químicas del suelo en cada horizonte medido (Cuadro 9). El nivel de pH en la superficie; los contenidos de P, K, las CE, los % de Ao, Li y Ar en ambas profundidades; y el contenido de Mg en el horizonte subsuperficial estuvieron fuertemente distribuidos en parches (Cuadro 9, Figuras 4a, 6, 7, 8b, 9, 10, 11 y 12). Por el contrario, el pH a nivel subsuperficial; el N en ambos horizontes y el contenido de Mg en la capa superficial del suelo, estuvieron correlacionados espacialmente en grado moderado (Cuadro 9; Figuras. 4b, 5 y 8a). Por otro lado, solo con excepción del contenido de P en el horizonte subsuperficial, el rango de los modelos de los semivariogramas fue superior a 1000 m indicando la presencia de una estructura espacial mayor que la distancia promedio de muestreo.

Cuadro 6. Estadísticas descriptivas del rendimiento de racimo frescos (n=196) y algunas propiedades de suelo estudiadas a 0 - 20 cm (n=196) y 20 - 40 cm (n=93) de profundidad.

Variable	Prof. (cm)	Min.	Max.	Media	Median.	p_{value}	DS	CV (%)
Rendimiento, t ha ⁻¹		13.9	30.6	21.0	20.9	0.010	2.7	35
pH	00 - 20	4.4	5.6	4.82 ^a	4.7	0.010	0.3	2
	20 - 40	4.3	5.7	4.90 ^b	4.8	0.038	0.3	2
N, %	00 - 20	0.0	0.1	0.07 ^a	0.1	0.025	0.0	1
	20 - 40	0.0	0.1	0.04 ^b	0.0	0.010	0.0	1
P, ppm	00 - 20	3.1	32.3	9.25 ^a	8.5	0.010	4.3	197
	20 - 40	2.2	12.0	5.27 ^b	4.9	0.010	1.6	49
K, ppm	00 - 20	31.0	304.0	93.85 ^a	82.0	0.010	46.2	2269
	20 - 40	24.0	138.0	54.47 ^b	50.0	0.010	26.0	1245
Mg, meq 100 g ⁻¹	00 - 20	0.1	1.2	0.40 ^a	0.4	0.010	0.2	8
	20 - 40	0.1	1.4	0.41 ^a	0.3	0.010	0.3	17
CE, mmhos cm ⁻¹	00 - 20	0.1	1.1	0.26 ^a	0.2	0.010	0.1	8
	20 - 40	0.1	0.6	0.18 ^b	0.2	0.010	0.1	5
Ao, %	00 - 20	24.0	85.3	52.17 ^a	50.0	0.010	13.2	333
	20 - 40	25.0	84.0	47.67 ^b	46.0	0.036	14.3	432
Li, %	00 - 20	14.0	56.0	35.42 ^a	36.0	0.093	8.1	185
	20 - 40	16.0	55.0	36.44 ^a	36.0	0.100	7.8	169
Ar, %	00 - 20	0.0	29.0	12.36 ^a	12.0	0.068	6.7	361
	20 - 40	0.0	44.0	17.33 ^b	15.0	0.010	11.1	715

Rendimiento de racimos frescos de palma; pH, reacción del suelo; N, nitrógeno; P, fósforo; K, potasio; Mg, magnesio; Ao, arena; Li, Limo; Ar, arcilla y CE, conductividad eléctrica.

p_{value} de la prueba de Shapiro-Wilk utilizada para probar el nivel de significancia de la normalidad ($p < 0.05$); SD: Desviación estándar

Medias de cada variable seguidas por la misma letra no difieren significativamente según la prueba one way ANOVA ($p < 0.05$)

Cuadro 7. Estadísticas descriptivas de variables medidas en las calicatas (n=26).

Variable	Prof. (cm)	Min.	Max.	Media	Median.	p_{value}	DS	CV (%)
pH	00 - 20	3.70	7.00	4.45 ^a	4.35	0.01	0.65	10
	20 - 40	4.10	5.40	4.60 ^a	4.60	0.10	0.33	2
	40 - ≤90	4.10	5.80	4.81 ^b	4.80	0.10	0.39	3
MO, %	00 - 20	0.50	3.02	1.66 ^a	1.63	0.10	0.60	22
	20 - 40	0.30	2.40	1.12 ^b	1.04	0.10	0.60	32
	40 - ≤90	0.10	1.80	0.66 ^c	0.50	0.03	0.52	41
P, ppm	00 - 20	2.10	26.30	5.96 ^a	4.90	0.01	5.15	445
	20 - 40	2.10	9.50	4.17 ^a	3.10	0.01	1.93	89
	40 - ≤90	2.20	26.30	4.78 ^a	4.00	0.01	4.84	491
K, meq 100 g ⁻¹	00 - 20	0.07	0.87	0.19 ^a	0.14	0.01	0.16	14
	20 - 40	0.06	0.23	0.12 ^b	0.11	0.01	0.04	1
	40 - ≤90	0.05	0.30	0.10 ^c	0.10	0.01	0.05	2
Mg, meq 100 g ⁻¹	00 - 20	0.06	0.56	0.18 ^a	0.13	0.01	0.13	9
	20 - 40	0.06	0.66	0.20 ^a	0.15	0.01	0.15	11
	40 - ≤90	0.04	1.90	0.33 ^a	0.13	0.01	0.43	56
Ca, meq 100 g ⁻¹	00 - 20	0.13	1.60	0.65 ^a	0.50	0.01	0.37	22
	20 - 40	0.18	1.44	0.54 ^a	0.43	0.01	0.31	18
	40 - ≤90	0.17	1.29	0.53 ^a	0.43	0.01	0.29	16
CIC, meq 100 g ⁻¹	00 - 20	1.11	4.51	2.80 ^a	2.71	0.10	0.92	30
	20 - 40	1.20	4.49	2.40 ^a	2.24	0.08	0.93	36
	40 - ≤90	1.09	4.69	2.36 ^a	1.99	0.04	1.11	52
Al+H, meq 100 g ⁻¹	00 - 20	0.00	3.26	1.44 ^a	1.32	0.10	0.88	53
	20 - 40	0.19	3.42	1.13 ^a	0.99	0.03	0.81	58
	40 - ≤90	0.15	3.19	1.03 ^a	0.69	0.01	0.84	69
Ao, %	00 - 20	40.00	86.00	61.81 ^a	63.00	0.10	14.63	346
	20 - 40	22.00	94.00	58.31 ^a	61.00	0.10	21.09	763
	40 - ≤90	24.00	96.00	65.04 ^a	72.00	0.07	23.95	882
Li, %	00 - 20	14.00	52.00	31.77 ^a	31.00	0.10	10.01	316
	20 - 40	6.00	52.00	31.69 ^a	30.00	0.10	12.91	526
	40 - ≤90	4.00	58.00	26.96 ^a	22.00	0.10	15.83	929
Ar, %	00 - 20	0.00	18.00	6.42 ^a	5.00	0.10	6.18	596
	20 - 40	0.00	34.00	10.00 ^a	9.00	0.10	9.90	979
	40 - ≤90	0.00	34.00	8.00 ^a	4.00	0.04	10.32	1332

pH, reacción del suelo; MO, materia orgánica; P, fósforo; K, potasio; Mg, magnesio; Ca, calcio; CIC, capacidad de intercambio de cationes; Ao, arena; Li, Limo; Ar, arcilla y Al+H, aluminio + hidrógeno.

p_{value} de la prueba de Shapiro-Wilk utilizada para probar el nivel de significancia de la normalidad, SD: Desviación estándar

Medias de cada variable seguidas por la misma letra no difieren significativamente según la prueba one way ANOVA ($p < 0.05$)

Cuadro 8. Cambios en los contenidos de los principales elementos mayores después de 17 años de aprovechamiento intensivo (n=33) 1980 y 1997.

Variable	Año	Min.	Max.	Media	Mediana	p_{value}	DS	CV (%)
N, %	1980	0.00	0.30	0.14a	0.10	0.10	0.07	2
	1997	0.04	0.12	0.07b	0.07	0.10	0.02	1
P, ppm	1980	0.60	12.30	3.36a	2.85	0.01	2.20	144
	1997	4.63	21.40	9.14b	7.83	0.01	4.10	183
K, ppm	1980	19.54	117.24	57.91a	49.00	0.06	28.66	1419
	1997	35.92	186.93	99.49b	93.58	0.04	35.63	1276
Mg, mq 100 gr suelo ⁻¹	1980	0.08	0.54	0.24a	0.18	0.01	0.14	8
	1997	0.21	0.75	0.40b	0.38	0.01	0.13	4

N, nitrógeno; P, fósforo; K, potasio y Mg, magnesio

p_{value} de la prueba de Shapiro-Wilk utilizada para probar el nivel de significancia de la normalidad ($p<0.05$); SD, Desviación estándar

Medias de cada variable seguidas por la misma letra no difieren significativamente según la prueba one way ANOVA ($p<0.05$)

Cuadro 9. Parámetros de los semivariogramas teóricos de las propiedades físicas y químicas medidas a nivel superficial y subsuperficial del suelo.

Variable	Profund. (cm)	Model.	Varian. origen	Meseta	% Varian. origen	Clase espacial	Rango (m)	<i>r</i>	<i>r</i> *
Rendimiento, t ha ⁻¹		Gaus.	0.007	0.016	44	M	1264	0.89	0.58
pH	00 – 20	Gaus.	0.001	0.004	20	F	6772	0.99	0.82
	20 – 40	Esfer.	0.001	0.003	35	M	7300	0.86	0.74
N, %	00 – 20	Esfer.	0.030	0.115	26	M	4370	0.96	0.72
	20 – 40	Esfer.	0.062	0.210	30	M	3610	0.97	0.75
P, ppm	00 – 20	Esfer.	0.025	0.208	12	F	2330	0.96	0.70
	20 – 40	Gaus.	0.001	0.085	2	F	520	0.76	0.63
K, ppm	00 – 20	Exp.	0.023	0.206	11	F	2250	0.98	0.69
	20 – 40	Exp.	0.024	0.194	12	F	2430	0.97	0.54
Mg, meq 100 g ⁻¹	00 – 20	Exp.	0.115	0.235	49	M	13830	0.89	0.52
	20 – 40	Exp.	0.033	0.384	9	F	1860	0.96	0.56
CE, mmhos cm ⁻¹	00 – 20	Exp.	0.043	0.222	19	F	2760	0.95	0.64
	20 – 40	Exp.	0.011	0.188	6	F	1470	0.83	0.45
Ao, %	00 – 20	Exp.	0.007	0.070	10	F	2130	0.95	0.71
	20 – 40	Exp.	0.013	0.107	12	F	4950	0.98	0.75
Li, %	00 – 20**	Exp.	9.300	68.810	14	F	1650	0.98	0.56
	20 – 40**	Exp.	9.300	67.240	14	F	2580	0.93	0.54
Ar, %	00 – 20	Esfer.	0.021	0.835	7	F	2040	0.97	0.78
	20 – 40	Esfer.	0.001	0.786	0	F	2940	0.92	0.86

Rendimiento de racimos frescos de palma; pH, reacción del suelo; N, nitrógeno; P, fósforo; K, potasio; Mg, magnesio; Ao, arena; Li, Limo; Ar, arcilla y CE, conductividad eléctrica.

Profund., profundidad de muestreo; Model., Modelo del semivariograma (Esfer., esférico; Exp., exponencial y Gaus., Gaussiano); Varian. origen, variancia en el origen o a la mínima distancia de muestreo; meseta o variancia total; %Varian. origen, (=variancia en el origen/total variancia)x100=F, fuerte dependencia espacial (%Varian. origen <25); M, moderada dependencia espacial (25<%Varian. origen <75); *r*, coeficiente de correlación del modelo del semivariograma.

*coeficiente de correlación en la validación cruzada.

**variables no transformadas.

Con respecto a las propiedades químicas del suelo, las funciones de los semivariogramas que ajustaron el pH fueron Gausiano y esférico en los horizontes superficial y subsuperficial, respectivamente. Los valores de la variancia en el origen se mantienen constantes en ambas profundidades de muestreo y la meseta en el horizonte subsuperficial se reduce; mientras que, el valor del % de la variancia en el origen y el rango se incrementa en el horizonte más profundo. El modelo esférico es el que ajustó mejor la distribución espacial del contenido de N en ambos horizontes medidos. El valor de la variancia en el origen, la meseta y el % de variancia en el origen se incrementan a medida que se incrementa la profundidad de muestreo. Sin embargo, el rango es menor a horizontes más profundos.

El contenido de P, fue ajustado con los modelos esférico y Gausiano en el horizonte superficial y subsuperficial, respectivamente. La variancia en el origen, la meseta, el % de variancia en el origen y el rango fue mayor en el horizonte superficial. El modelo que explica la estructura espacial del contenido de K en ambos horizontes muestreados, es el exponencial. La variancia en el origen, la meseta, el % de variancia en el origen y el rango es semejante en ambos horizontes, aunque fuertemente agregados. Por su parte, el semivariograma del contenido de Mg fue explicado por el modelo exponencial en ambos horizontes. En el horizonte subsuperficial, los parámetros variancia en el origen, % de variancia en el origen y rango del modelo del semivariograma fueron muy altos comparado al horizonte superficial. El modelo que mejor ajustó la distribución espacial de la CE en ambos horizontes fue el exponencial. Los valores de variancia en el origen, meseta, % de variancia en el origen y rango fueron mayores en el horizonte superficial y estuvieron fuertemente agregados.

En cuanto a las propiedades físicas, la distribución espacial del contenido de Ao y Li fueron mejor explicados por el modelo exponencial. En el caso del contenido de Ao, la variancia en el origen, meseta, el % de variancia en el origen y el rango fue mayor en el horizonte subsuperficial; mientras que, para el contenido de Li, la variancia en el origen, la meseta y el % de variancia en el origen fueron semejantes en ambos horizontes muestreados. Por el contrario, el rango fue mayor en el horizonte subsuperficial. La variación estructural del contenido de Ar fue explicado por el modelo esférico en ambos horizontes muestreados. La variancia en el origen, la meseta y el % de variancia en el origen

es mayor en el horizonte superficial, aunque el rango es menor en este horizonte (Cuadro 9).

Los mapas de distribución de las cantidades de fertilizantes aplicados en campo un año antes del muestreo, se muestran en las Figuras 3 y 4. El promedio ponderado de cada uno de los fertilizantes aplicados es: 870, 704, 1751 y 962 g planta⁻¹ de urea, superfosfato triple, cloruro de potasio y kieserita, respectivamente.

4.3 Análisis de la distribución espacial de las propiedades del suelo.

Los mapas, para cada una de las variables de suelo en estudio, desarrollados utilizando el procedimiento de krigado en puntos se indican en las Figuras 5 – 14. Los niveles de rendimiento de racimos frutos de palma más bajos (<14.9 - <19.4 t ha⁻¹) se observan en la parte nor-oeste del campo coincidiendo con suelos de tipo 2 + 3 (de erosión mediana a muy fuerte). Por el contrario, los niveles mas altos (>21.6 - >25.4 t ha⁻¹) se observan en la parte central del campo coincidiendo con los suelos de tipo 0 + 1 (sin erosión a leve erosión) (Figura 5).

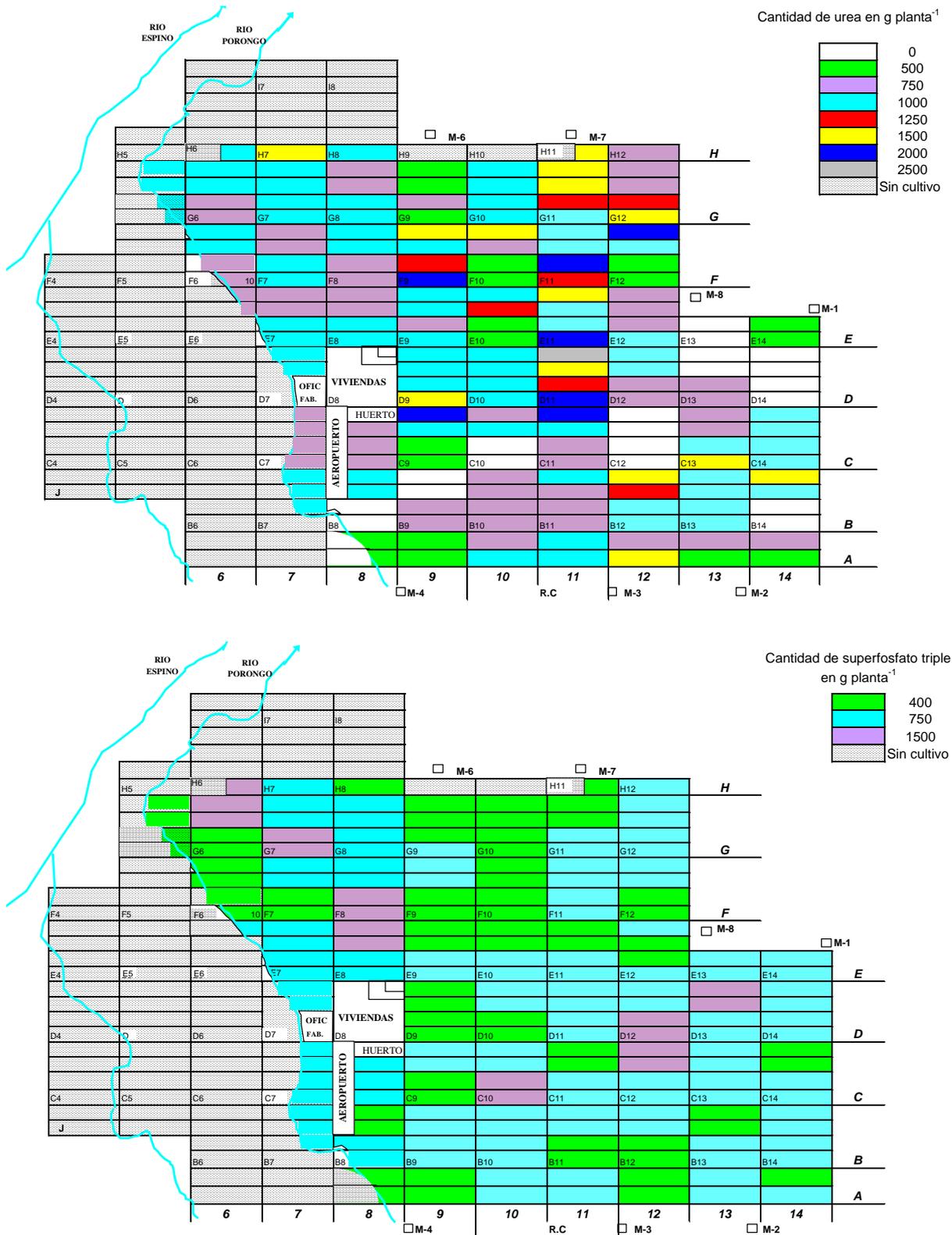


Figura 3. Mapa de distribución de las aplicaciones de urea y superfosfato triple en la plantación un año antes de la realización del presente estudio.

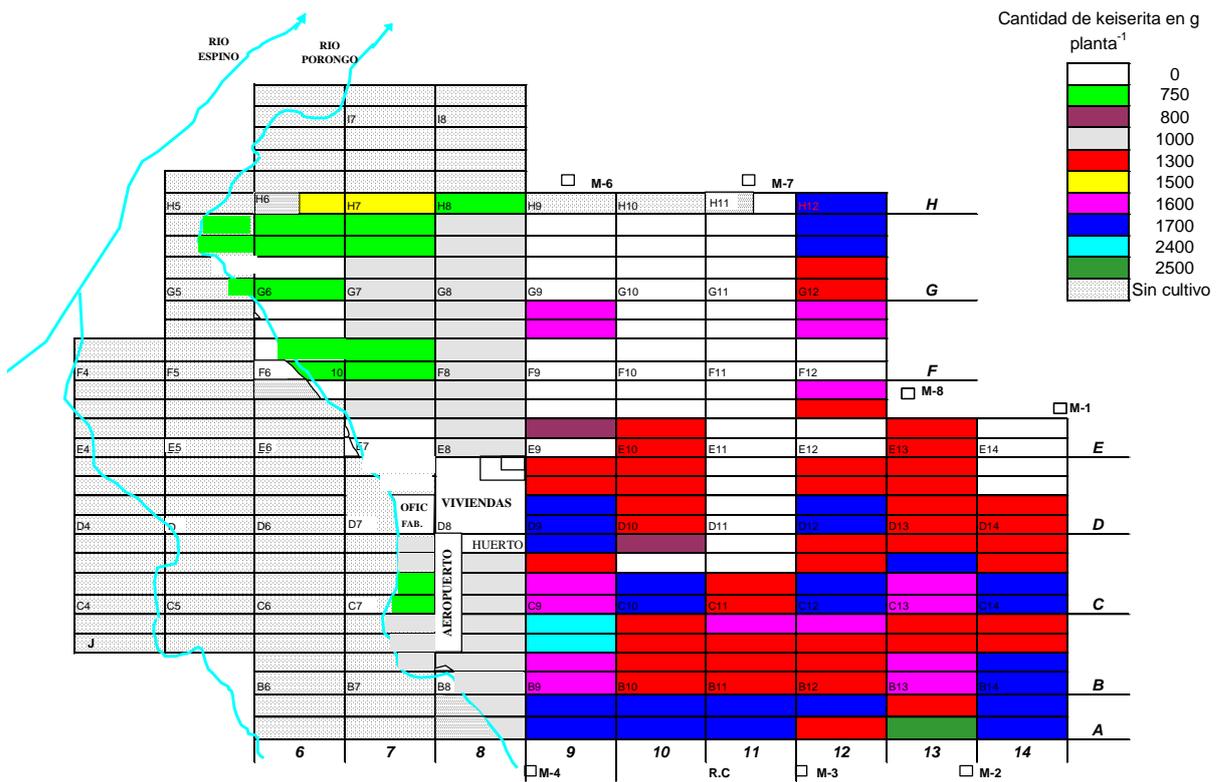
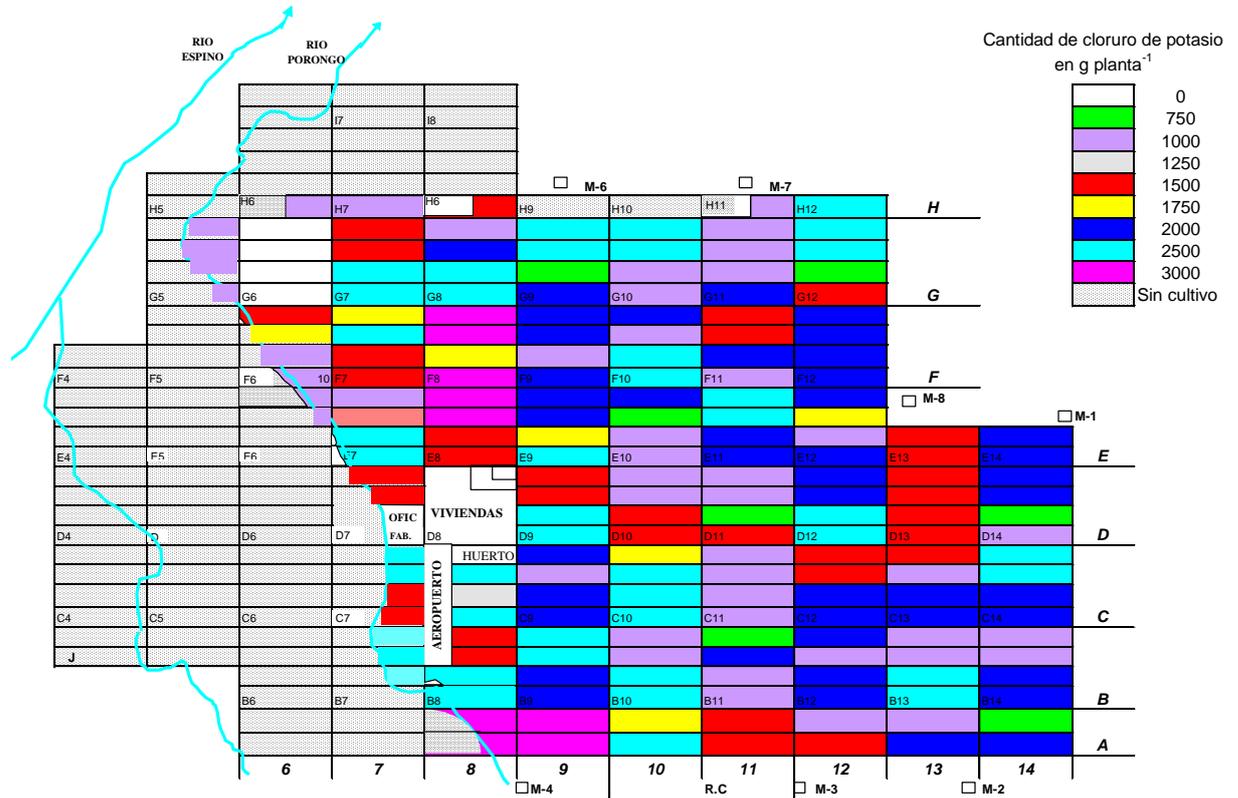


Figura 4. Mapa de distribución de las fertilizaciones con cloruro de potasio y kieserita en la plantación un año antes de la realización del presente estudio.

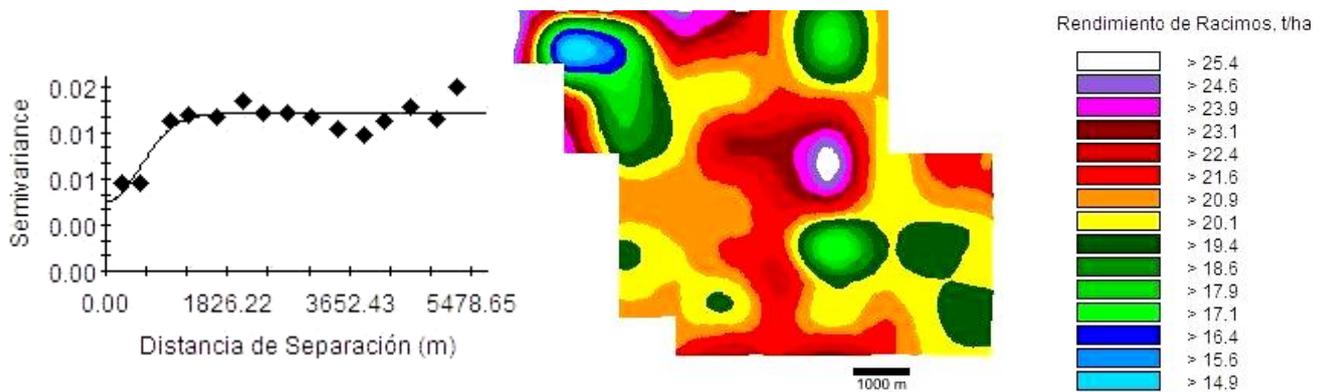


Figura 5. Semivariograma y mapa krigeado del rendimiento de fruta de palma

En cuanto a las propiedades químicas del suelo, el pH medido en ambas profundidades del suelo, muestra un gradiente uniforme de reducción desde la parte sur-este del campo hacia la parte nor-oeste, siendo más marcada en el horizonte subsuperficial. Los valores de pH en el horizonte superficial variaron de >4.48 - >5.58 y en el horizonte subsuperficial de >4.62 - >5.43, de acuerdo al Cuadro 1, corresponde a un nivel moderado a alto (Figura 6).

El contenido de N muestra una gradiente uniforme en ambos horizontes sin la existencia de agregados, aunque tiende a reducir hacia la parte sur del campo de este a oeste. Sin embargo, los contenidos de N para los requerimientos de palma aceitera, en ambos horizontes están a niveles bajos o muy bajos (Figura 7).

En cuanto al contenido de P en el suelo, en el horizonte superficial se observó tres agregados. Dos de ellos con un intervalo de >7.6 – >17.9 ppm se ubicaron en la parte oeste del campo y un agregado muy grande, pero de un menor intervalo >3.7 – >6.1 ppm se ubicó en la parte central del campo que va de norte a sur (Figura 8). En el horizonte subsuperficial, la tendencia es más uniforme aunque existen muchos agregados, los intervalos son reducidos variando desde >3.6 a >4.9 ppm; sin embargo, se destaca un agregado muy marcado (>6.3 - >11.6 ppm) en la parte nor-este del campo. En ambos horizontes muestreados, el contenido del P, para los requerimientos de palma aceitera, fue bajo y muy bajo (Figura 8).

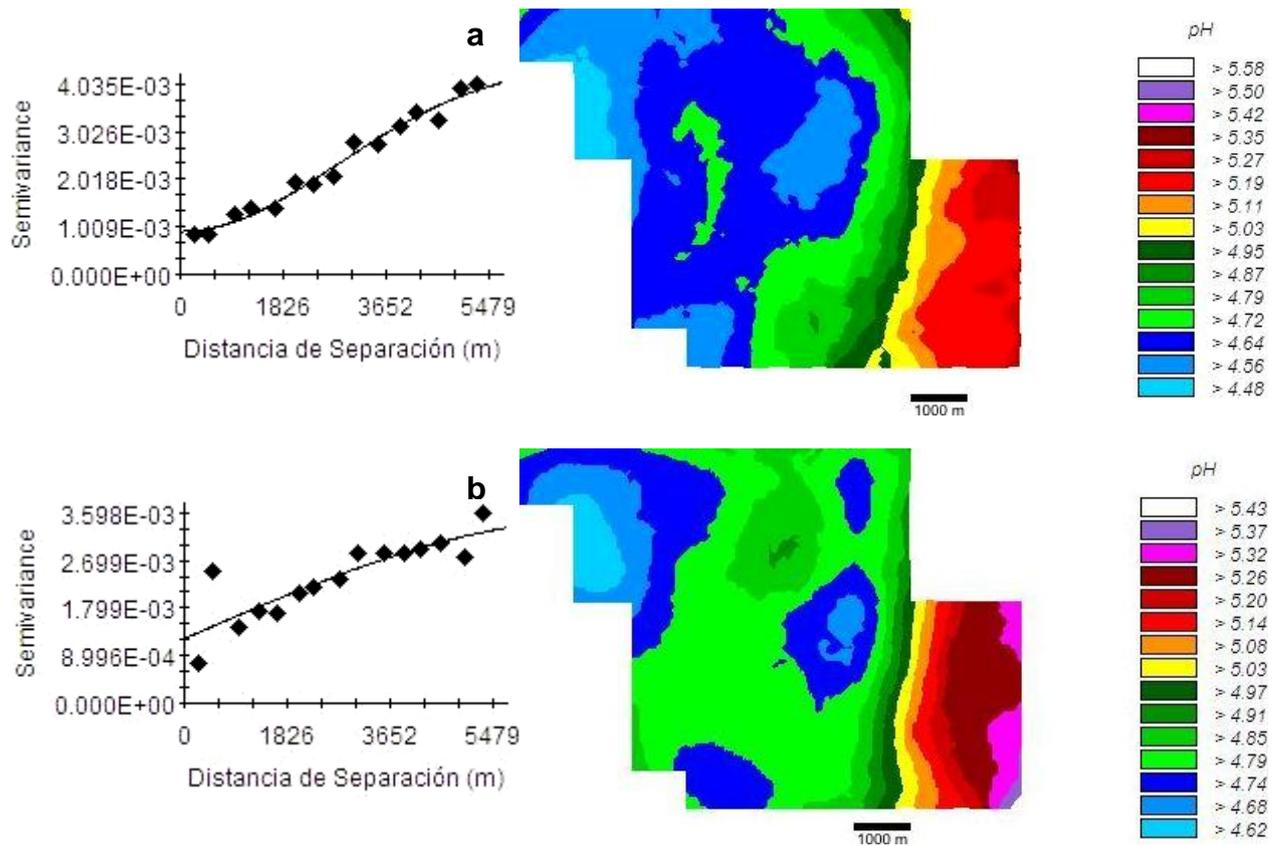


Figura 6. Semivariogramas y mapas krigeados del nivel de pH en el horizonte (a) superficial, y (b) subsuperficial del suelo.

El K, también muestra una marcada agregación. La tendencia en el contenido espacial en ambos horizontes es semejante. Los mas altos contenidos de K se encuentran en la parte nor-este del campo tendiendo a reducir hacia la parte oeste de la plantación. Es posible observar agregados de bajos niveles de potasio (>26 - >39 ppm) en posición diagonal desde el sur-este hacia el nor-oeste del campo. De acuerdo a la tabla de interpretación de suelos, los niveles de K se clasificaron como bajo y medio, observándose las deficiencias mas severas en el horizonte subsuperficial (Figura 9).

El contenido de Mg en el horizonte superficial, muestra dos gradientes muy marcados. Uno que va desde la parte nor-oeste y otro desde el sur-este; sin embargo, ambas gradientes no se extienden más allá 100 m de ancho. En el resto del campo la tendencia es moderada sin formar parches muy marcados (Figura 10a).

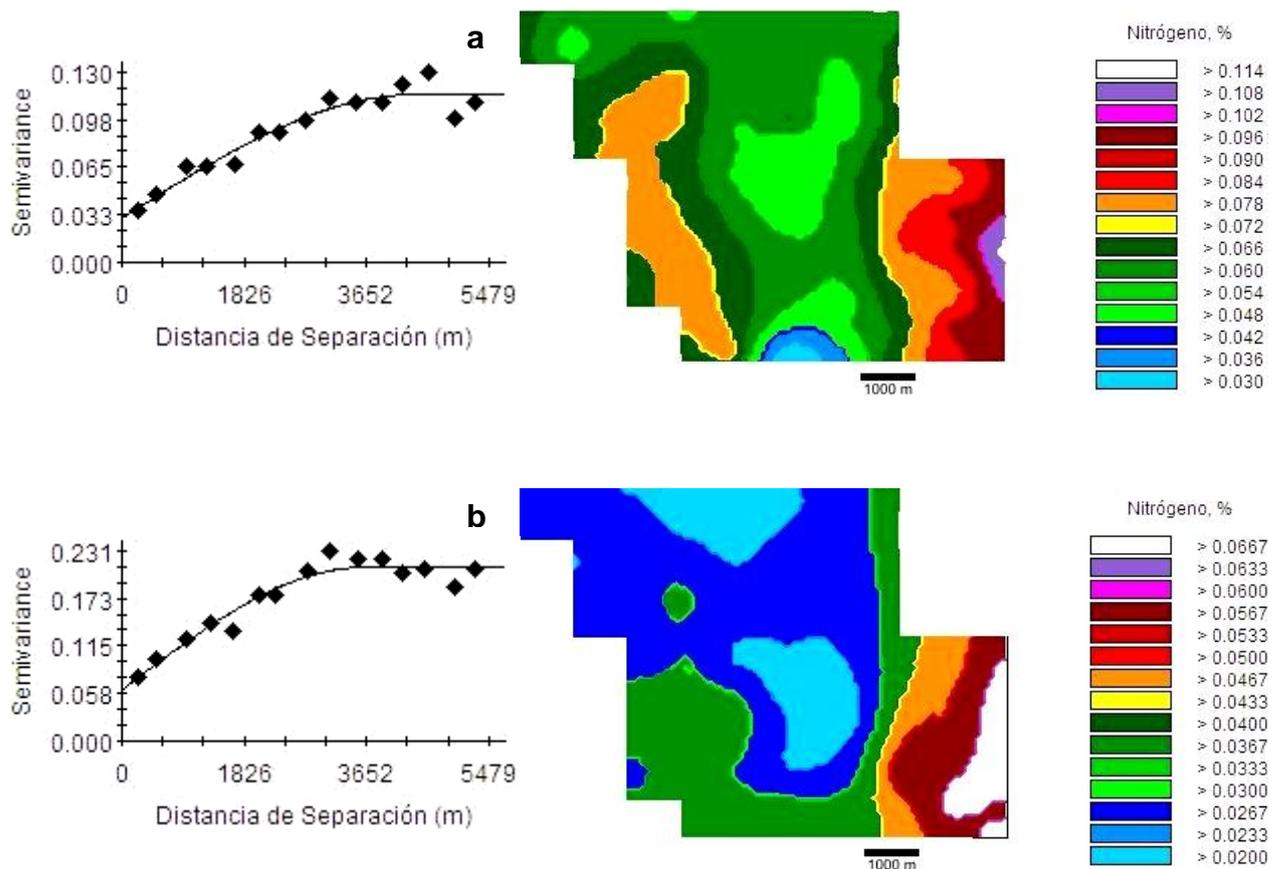


Figura 7. Semivariogramas y mapas krigeados del nivel de N en el horizonte (a) superficial, y (b) subsuperficial del suelo.

En el horizonte subsuperficial; en la parte sur-este del campo se observó una gradiente en dirección este-oeste que se extiende no mas de 500 m; sin embargo, existe un parche que se extiende desde el centro hacia el norte y sur del campo en forma alargada que contiene altos niveles de Mg (>0.35 - >0.79 meq 100 g^{-1}). De acuerdo a los requerimientos de palma aceitera, los contenidos de Mg en ambos horizontes varían desde moderados a altos (Figura 10).

La CE en ambos horizontes muestra fuerte agregación. Aunque en todo el campo y en ambos horizontes el nivel de CE es normal. En el horizonte superficial destaca un agregado que se extiende desde la parte norte hacia el sur pero en el lado este del campo (>0.28 - >0.60 mmhos cm^{-1}). En cambio, en el horizonte subsuperficial un agregado de menor tamaño se presenta en la parte central del campo en el lado oeste. La porción del campo compuesta por suelos aguajales, bajales y neajales presenta los menores valores de CE (Figura 11).

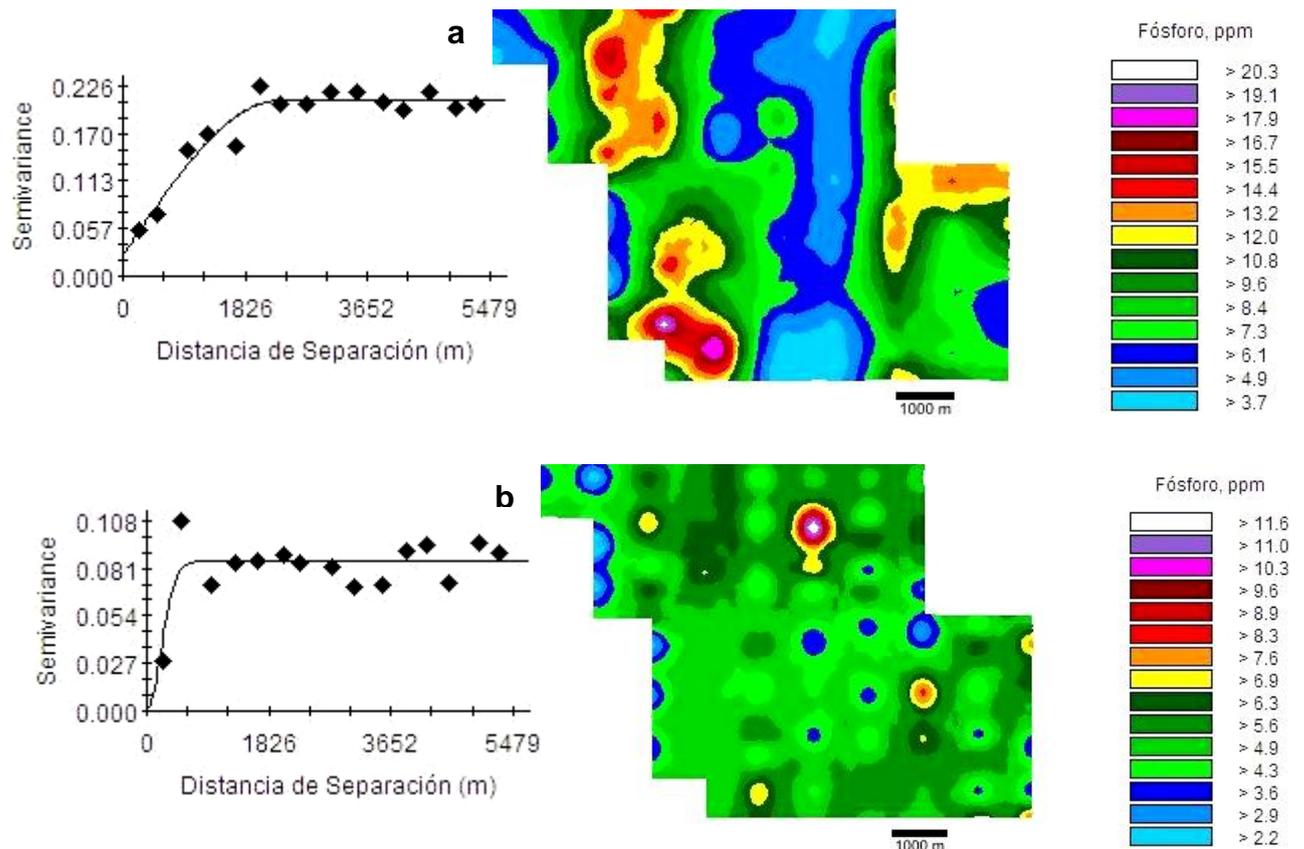


Figura 8. Semivariogramas y mapas krigeados del nivel de P en el horizonte (a) superficial, y (b) subsuperficial del suelo.

En cuanto a las propiedades físicas, todas las propiedades medidas mostraron una fuerte agregación. El contenido de Ao muestra agregados muy marcados en ambos horizontes, aunque en mayor grado en el horizonte superficial. Los mas altos porcentajes de Ao se sitúan en la parte sur-oeste del campo con una gradiente que disminuye hacia todos los lados variando desde >48.3 hasta >70.7% y que abarca mas del 50% del campo. En el horizonte subsuperficial, la gradiente es más marcada y se extiende de sur-oeste hacia nor-este (Figura 12).

El contenido de Li, también muestra una tendencia agregada en ambos horizontes. Destaca un parche en la parte sur-este del campo con un intervalo de >48.6 hasta 36.2%. En el horizonte subsuperficial, se observa una gradiente mas homogénea y se extiende desde la parte nor-este hacia sur-oeste del campo (Figura 13).

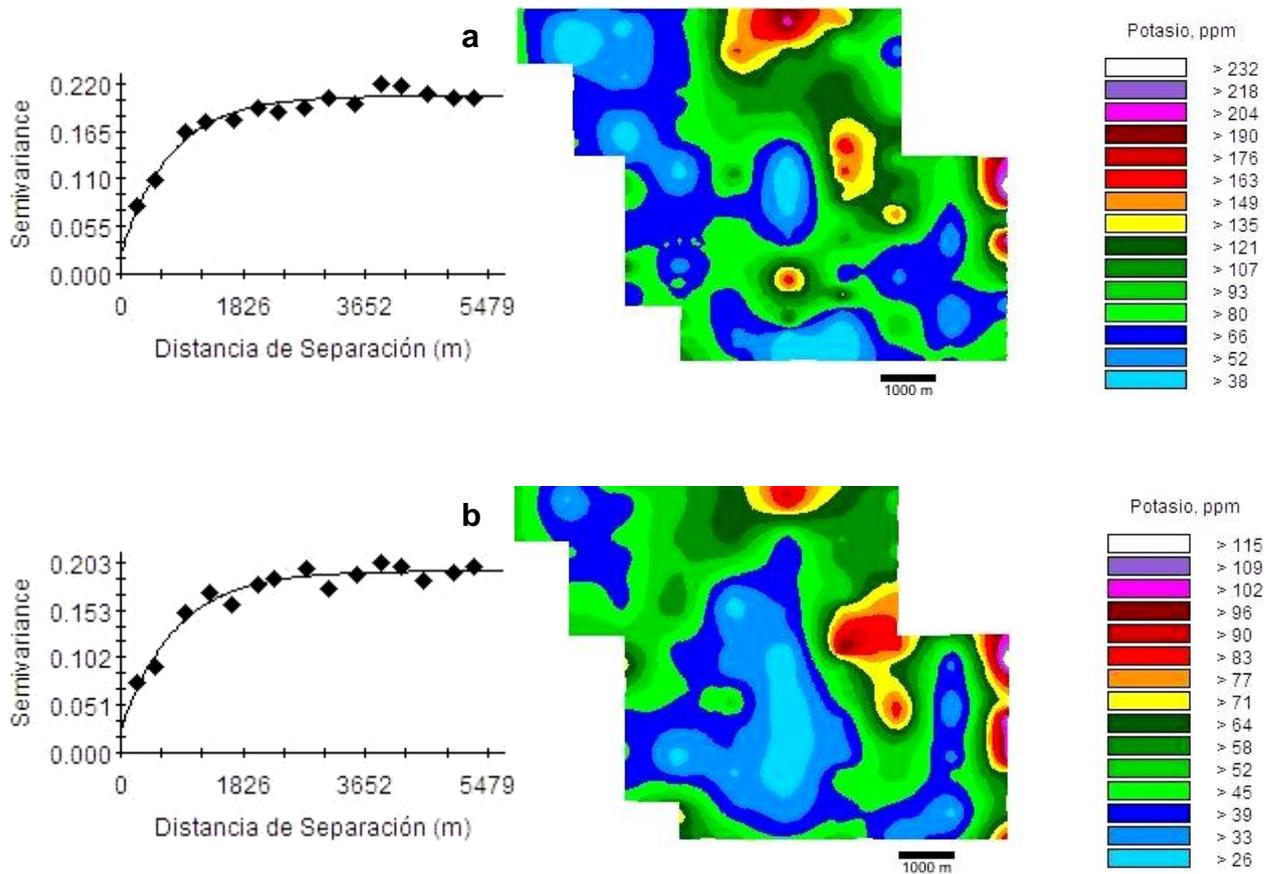


Figura 9. Semivariogramas y mapas krigeados del nivel de K en el horizonte (a) superficial, y (b) subsuperficial del suelo.

El contenido de Ar, destaca la presencia de un agregado que se extiende desde la parte nor-este del campo hacia el sur en ambos horizontes; sin embargo, en el horizonte subsuperficial destaca un agregado de altos contenidos de Ar ubicado en el centro del campo hacia la mitad superior (norte) que coincide con el área de la plantación cuyo suelo ha sido clasificado como aguajal, neajal o bajjal. La mayor parte del campo presenta contenidos de Ar menores del 20% (Figura 14).

4.4 Análisis de variancia del experimento CP1.

El análisis del modelo general lineal de los efectos principales y las interacciones de los niveles de P, K, Mg y N ensayados, no fueron significativos para el rendimiento de racimos de palma (datos no mostrados).

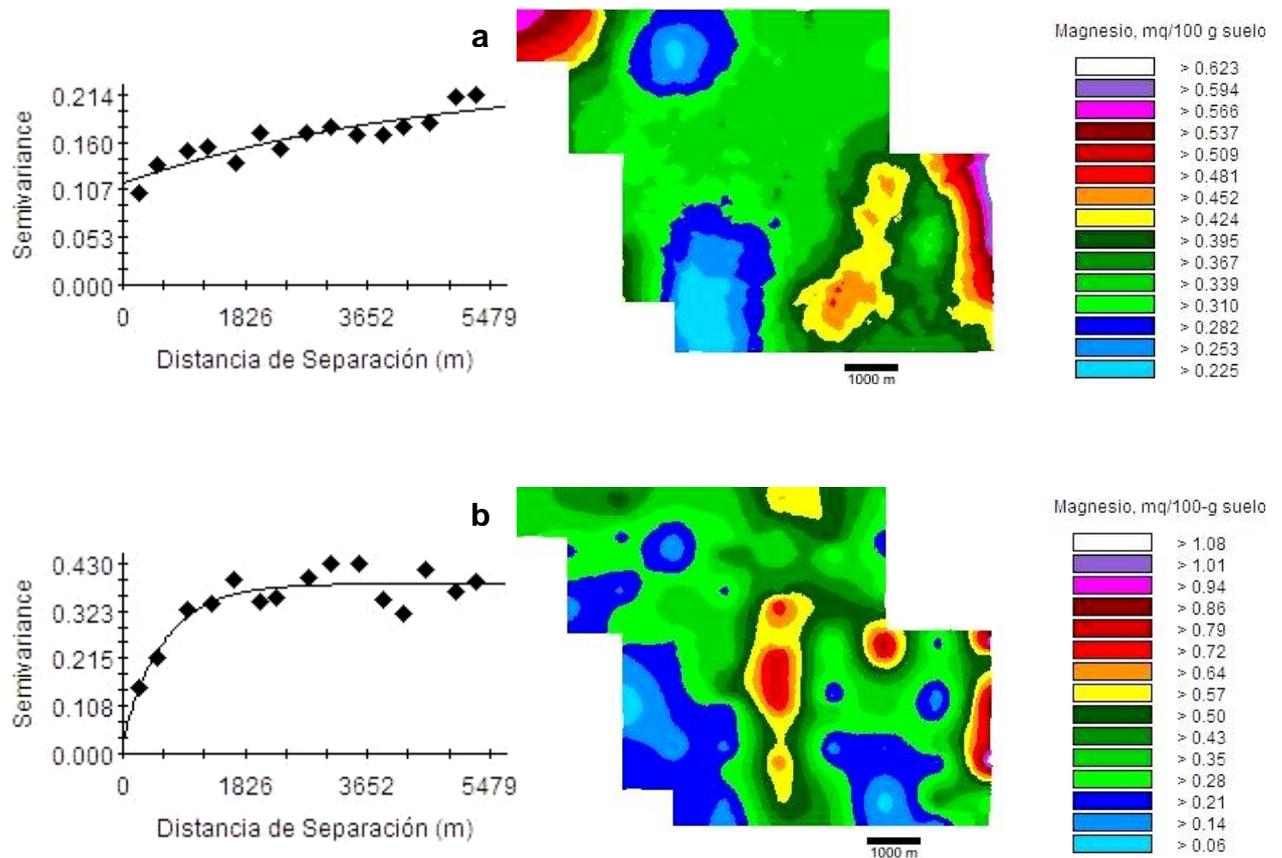


Figura 10. Semivariogramas y mapas krigeados del nivel de Mg en el horizonte (a) superficial, y (b) subsuperficial del suelo.

El resultado de la prueba pareada de 't' entre las medias de las parcelas tratadas con fertilizantes versus las parcelas sin-fertilizantes que se muestra en el Cuadro 10, revela que los únicos tratamientos que lograron incrementos significativos ($p < 0.05$) en el rendimiento de frutos de palma aceitera, con respecto al testigo sin-fertilización, fueron: 0-4000-1500-1500, 750-4000-1500-1500 y 1500-2000-1500-0 g planta⁻¹ de superfosfato triple, cloruro de potasio, kieserita y urea, respectivamente. En promedio estas parcelas alcanzaron un rendimiento de 23.57 t ha⁻¹ de frutos de palma. En comparación al testigo sin-fertilizantes, el incremento del rendimiento fue de 38.6% (Cuadro 10).

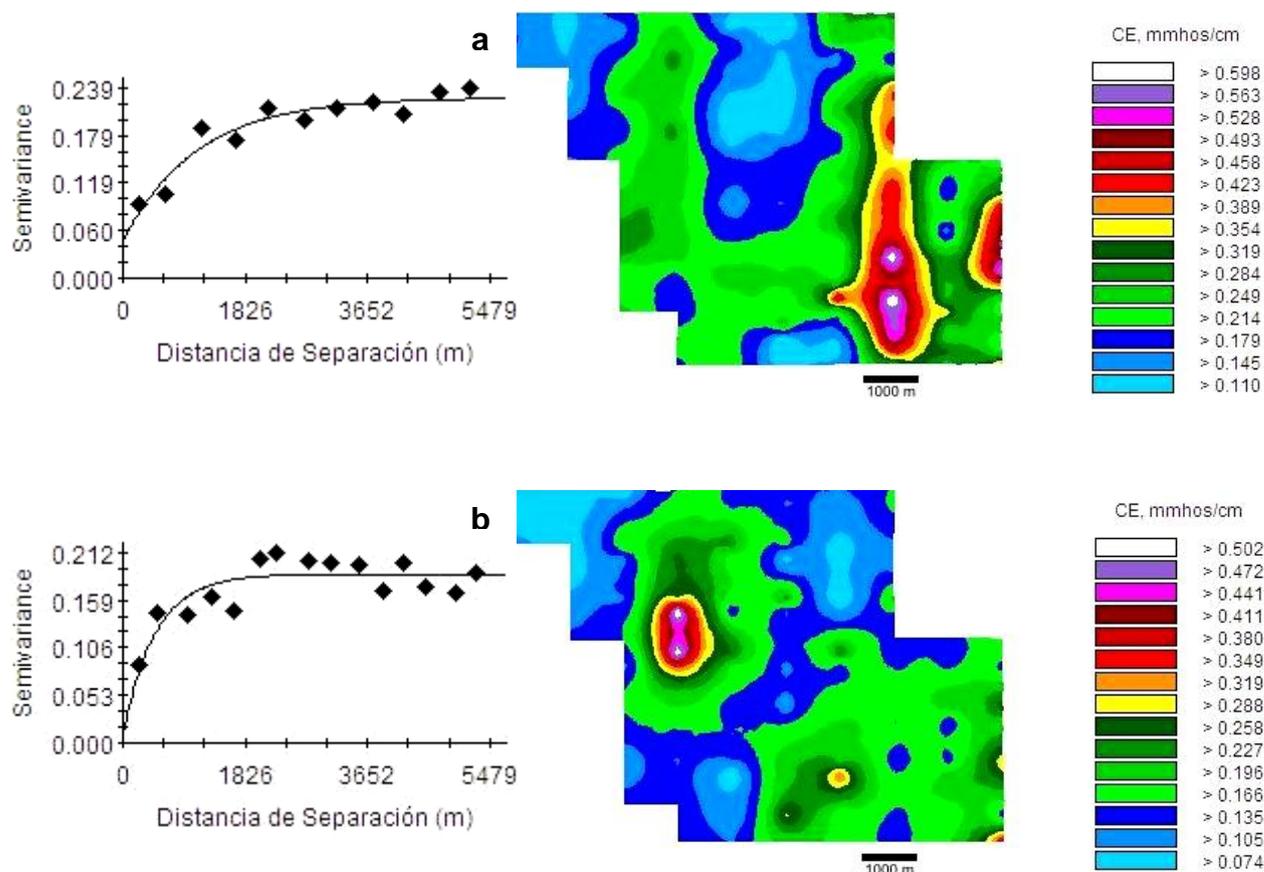


Figura 11. Semivariogramas y mapas krigeados del nivel de CE en el horizonte (a) superficial, y (b) subsuperficial del suelo.

Ordenando en forma ascendente los rendimientos promedios de las parcelas fertilizadas, destacan por su elevado rendimiento (26.24 t ha^{-1}) los tratamientos 1500-2000-3000-1500 y 750-4000-3000-1500 g planta⁻¹ de superfosfato triple, cloruro de potasio, kieserita y urea, respectivamente. Sin embargo, según la prueba de 't' estos rendimientos no son significativamente más altos que el testigo sin-fertilización. Esto, probablemente se debe, a que los tratamientos que dieron, en promedio, los rendimientos más altos poseen variancias muy elevadas (datos no mostrados).

4.5 Análisis de la superficie de respuesta del experimento CP01

El análisis de superficie de respuestas del rendimiento de racimos de fruta mostró respuestas muy variadas para las diferentes combinaciones de los tratamientos. Se ha considerado, solo las respuestas lineales o cuadráticas altamente significativas ($p < 0.01$) y que expliquen más del 80% de la variable dependiente.

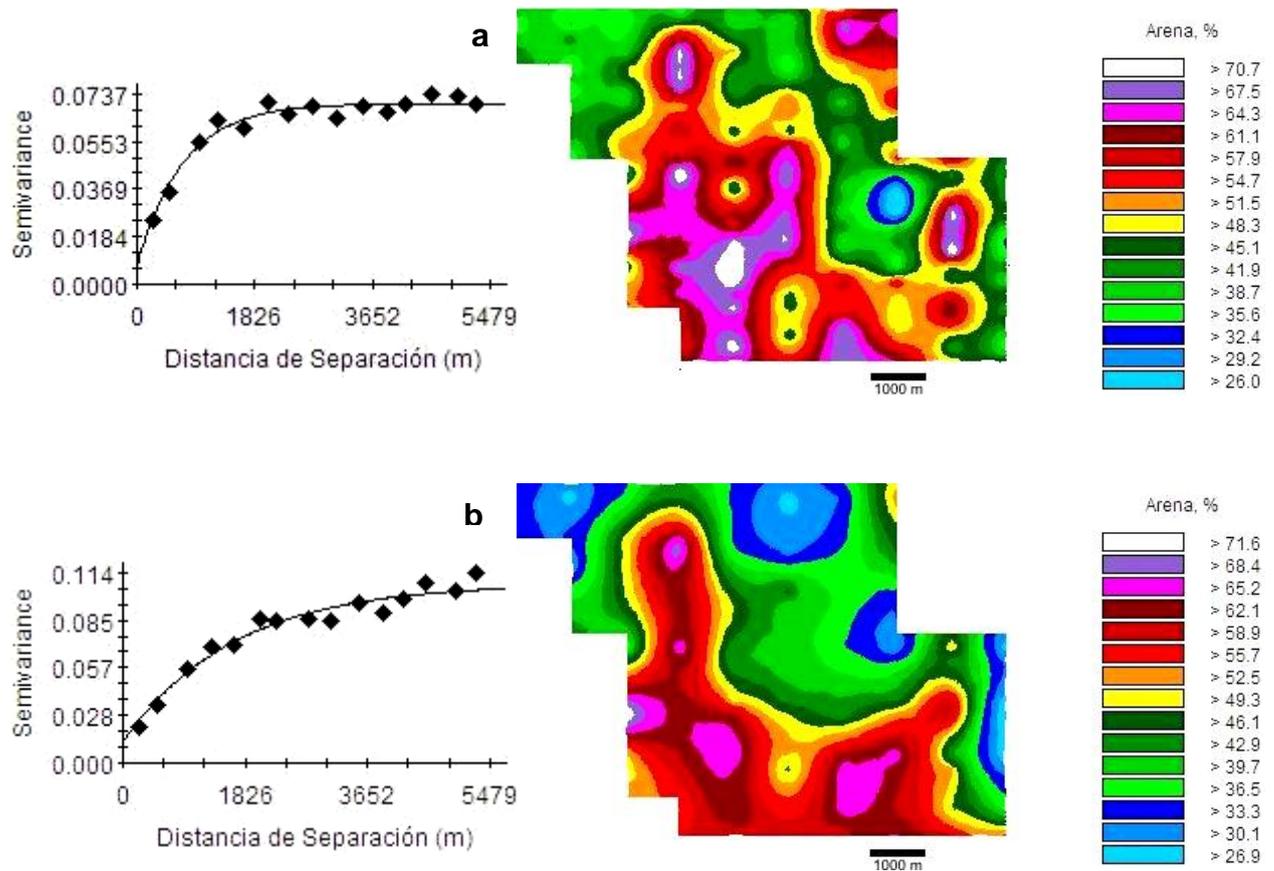


Figura 12. Semivariogramas y mapas krigeados del nivel de Ao en el horizonte (a) superficial, y (b) subsuperficial del suelo.

En general, las sub-parcelas sin-aplicación de urea, mostraron solo seis interacciones altamente significativas (Figura 15); mientras que, las sub-parcelas fertilizadas con $1500 \text{ g planta}^{-1}$ de urea, mostraron 24 combinaciones de fertilizantes altamente significativas (Figuras 16, 17, 18 y 19).

En la Figura 15, manteniendo constante el cloruro de potasio y la kieserita en 2000 y $3000 \text{ g planta}^{-1}$, respectivamente. Es posible notar un incremento lineal positivo del rendimiento de racimos de palma a medida que se incrementa el superfosfato triple (0 , 750 y $1500 \text{ g planta}^{-1}$) llegando a un máximo de 25.1 t ha^{-1} a la dosis máxima de superfosfato triple (Figura 15a). Por el contrario, si se mantiene las dosis máximas ensayadas de superfosfato triple y de kieserita en 1500 y $3000 \text{ g planta}^{-1}$, respectivamente. Al incrementar la dosis de cloruro de potasio (0 , 2000 y $4000 \text{ g planta}^{-1}$) el máximo rendimiento (25.1 t ha^{-1}) se obtiene con la dosis media (Figura 15b).

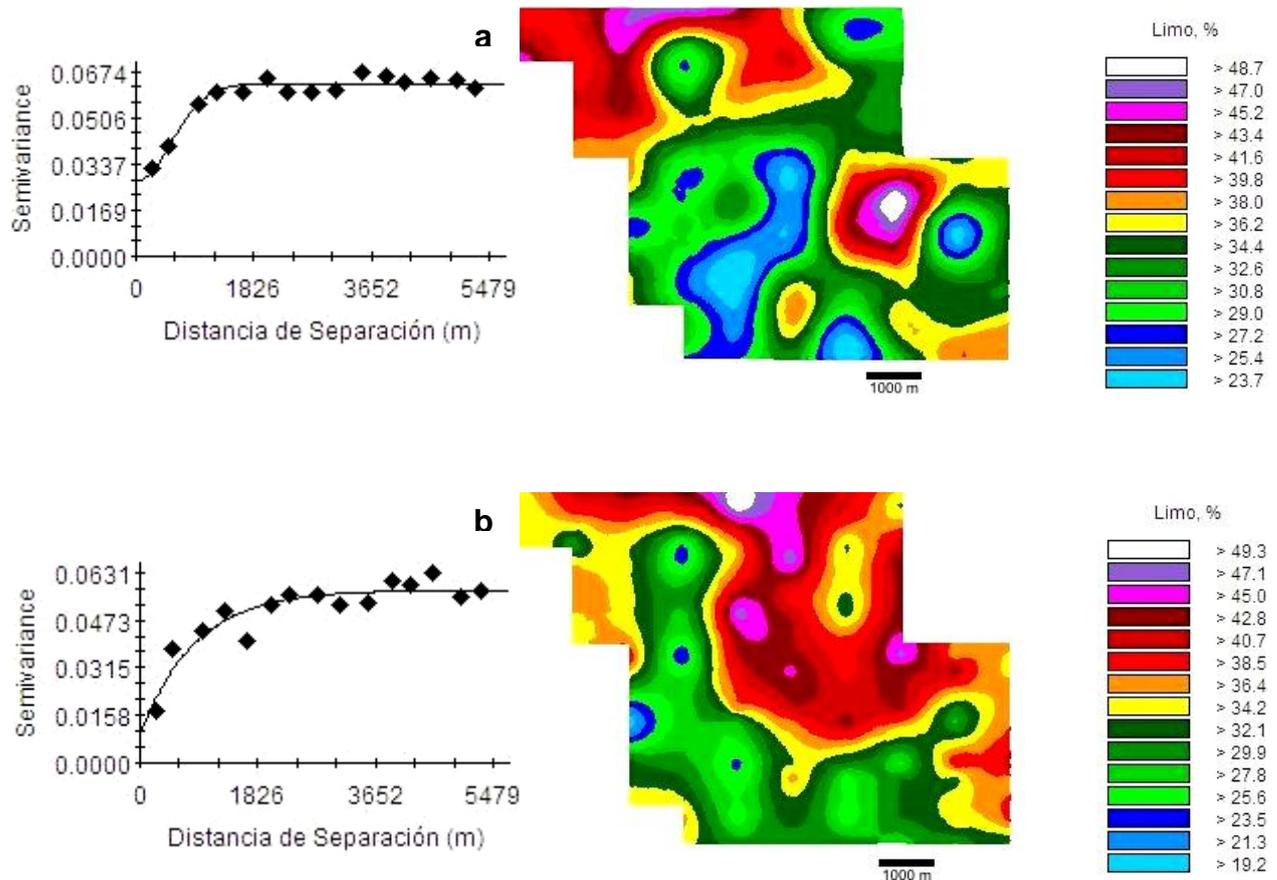


Figura 13. Semivariogramas y mapas krigeados del nivel de Li en el horizonte (a) superficial, y (b) subsuperficial del suelo.

La respuesta de la producción de racimos de palma en las parcelas con incrementos simultáneos de las tres dosis ensayadas de superfosfato triple junto con las tres dosis de cloruro de potasio, manteniendo una dosis media ($1500 \text{ g planta}^{-1}$) de la kieserita, es cuadrática, pero con un rendimiento mínimo (17.9 t ha^{-1}) en las dosis medias del superfosfato triple y el cloruro de potasio (Figura 15c). Una respuesta semejante se observa cuando se incrementa simultáneamente el cloruro de potasio y la kieserita, manteniendo el superfosfato triple en $750 \text{ g planta}^{-1}$, los rendimientos no superan las 20 t ha^{-1} (Figura 15e). El incremento simultáneo de superfosfato triple junto con kieserita a las tres dosis ensayadas, bajo una dosis constante de cloruro de potasio ($2000 \text{ g planta}^{-1}$), permitió obtener un significativo incremento del rendimiento (23.4 t ha^{-1}) a las dosis más altas de ambos fertilizantes (Figura 15d).

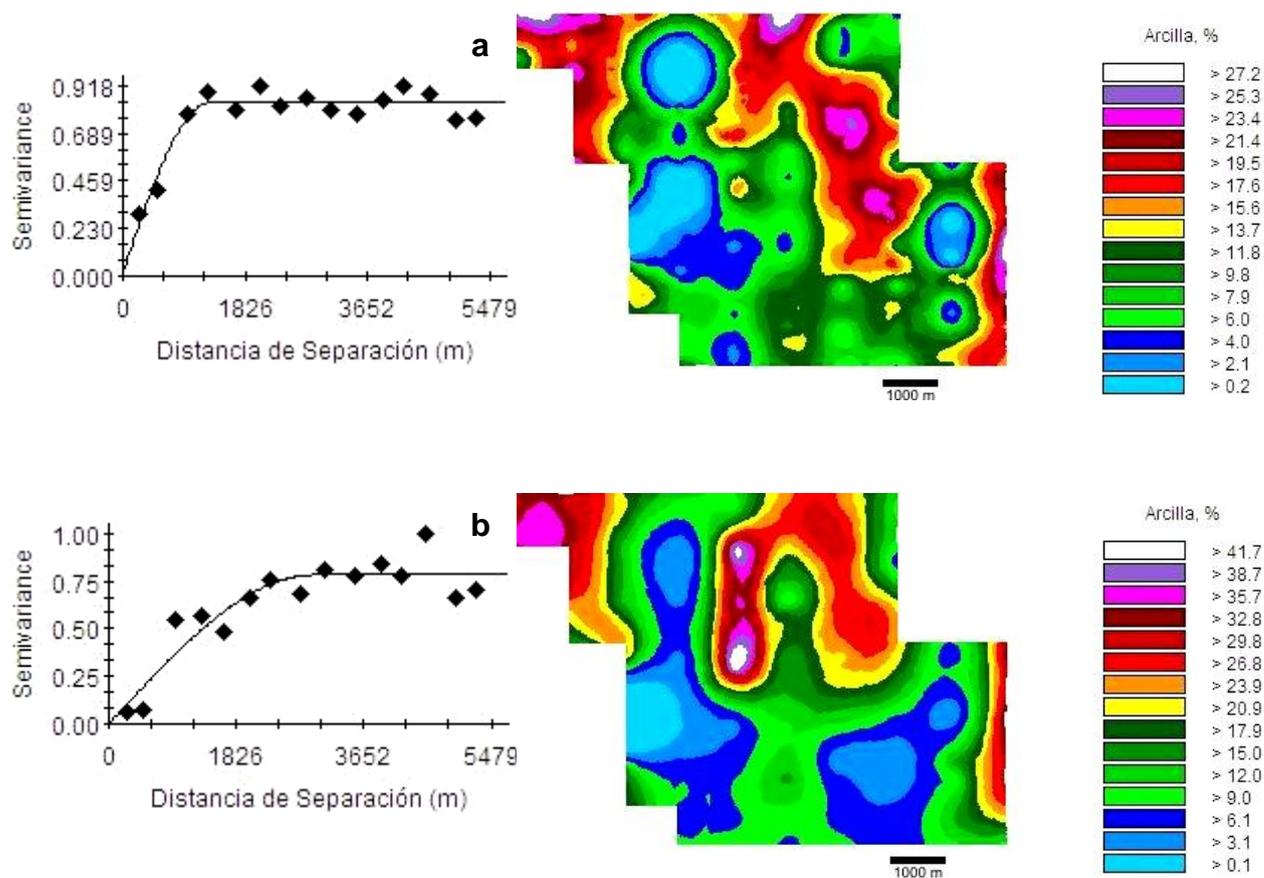


Figura 14. Semivariogramas y mapas krigeados del nivel de Ar en el horizonte (a) superficial, y (b) subsuperficial del suelo.

Con el incremento simultáneo de las tres dosis de cloruro de potasio y kieserita, manteniendo constante el superfosfato triple en $1500 \text{ g planta}^{-1}$, se logró una respuesta significativa (23.4 t ha^{-1}) en la dosis media de ambos fertilizantes (Figura 15f); sin embargo, el rendimiento cayó a 17.7 t ha^{-1} en las dosis máximas del cloruro de potasio y kieserita.

En las Figuras 16, 17, 18 y 19, se muestran las respuestas del rendimiento en las sub-parcelas fertilizadas con $1500 \text{ g planta}^{-1}$ de urea. El rendimiento promedio en las parcelas con incrementos simultáneos de las tres dosis ensayadas de cualquiera de las siguientes combinaciones: superfosfato triple con cloruro de potasio, superfosfato triple con kieserita y cloruro de potasio con kieserita, fueron inferiores a 20 t ha^{-1} de racimos de palma; sin embargo, en todos los casos las dosis intermedias de las combinaciones dieron las máximas respuestas (21 t ha^{-1}) (Figuras 16a, 16b y 16c).

Cuadro 10. Rendimiento de racimos de palma aceitera (t ha⁻¹) según los tratamientos ensayados en el experimento factorial CP01.

Fertilizantes (g planta ⁻¹)		Kieserita (g planta ⁻¹)					
		0		1,500		3,000	
Superfosfato triple	Cloruro de potasio	Urea (g planta ⁻¹)		Urea (g planta ⁻¹)		Urea (g planta ⁻¹)	
		0	1,500	0	1,500	0	1,500
0	0	17.01^a	16.92 ^a	19.80 ^a	18.78 ^a	20.37 ^a	15.96 ^a
	2,000	19.89 ^a	16.91 ^a	17.94 ^a	20.97 ^a	18.26 ^a	21.64 ^a
	4,000	17.79 ^a	18.39 ^a	20.96 ^a	23.90 ^b	18.29 ^a	18.82 ^a
750	0	22.23 ^a	17.17 ^a	17.72 ^a	20.99 ^a	19.10 ^a	14.96 ^a
	2,000	19.53 ^a	24.47 ^a	19.91 ^a	18.95 ^a	18.87 ^a	22.31 ^a
	4,000	18.21 ^a	22.45 ^a	15.99 ^a	22.62 ^b	19.29 ^a	25.72 ^a
1,500	0	20.48 ^a	19.35 ^a	20.17 ^a	21.16 ^a	19.80 ^a	20.30 ^a
	2,000	21.05 ^a	19.02 ^a	24.19 ^b	22.96 ^a	25.08 ^a	26.76 ^a
	4,000	18.14 ^a	17.74 ^a	16.75 ^a	19.51 ^a	18.36 ^a	21.72 ^a

Medias seguidas de la misma letra no difieren significativamente a $p=0.05$. Según la prueba pareada de 't'.

En negrita testigo sin-fertilización.

En las parcelas donde se mantuvo constante el cloruro de potasio en 2000 y en 4000 g planta⁻¹ sin aplicar kieserita pero, incrementando el superfosfato triple, se obtuvieron respuestas cuadráticas con un pico máximo (23.5 t ha⁻¹) a la dosis media del superfosfato triple (Figuras 16d y 16f); por el contrario, en la parcela donde se incrementó el superfosfato triple y se mantuvo constante el cloruro de potasio y la kieserita en 2000 y 3000 g planta⁻¹, respectivamente, la respuesta fue significativamente lineal llegando a un rendimiento de 26.8 t ha⁻¹ a la máxima dosis del superfosfato triple (Figura 16e).

Si se mantiene constante el cloruro de potasio a 4000 g planta⁻¹ y la kieserita a 1500 g planta⁻¹ al incrementar el superfosfato triple, la respuesta del rendimiento es de tipo lineal negativo, pero siempre por encima de 22 t ha⁻¹ (Figura 17a). La tendencia del rendimiento, en las parcelas tratadas con incrementos del superfosfato triple, manteniendo constante el cloruro de potasio y la kieserita a las dosis máximas ensayadas, es cuadrática con un rendimiento máximo de 25.7 t ha⁻¹ a la dosis media del superfosfato triple (Figura 17b). Las parcelas que fueron tratadas con dosis crecientes de cloruro de potasio, sin aplicación del superfosfato triple y manteniendo la dosis de kieserita en 1500 g planta⁻¹, respondieron en forma lineal positiva, llegando a un rendimiento de 23.9 t ha⁻¹, a la dosis mas alta de cloruro de potasio (Figura 17c). Si en estas mismas parcelas tratadas con incrementos de cloruro de potasio, se aplica 750 g planta⁻¹ de superfosfato triple y 3000 g planta⁻¹ de kieserita, la respuesta sigue siendo lineal, pero el rendimiento llegó a 25.7 t ha⁻¹ a la dosis máxima del cloruro de potasio (Figura 17d).

Manteniendo constante el superfosfato triple y la kieserita en 1500 y 3000 g planta⁻¹, respectivamente con incrementos del cloruro de potasio, el rendimiento posee una tendencia cuadrática con un rendimiento máximo de 26.8 t ha⁻¹ de racimos de palma a la dosis media del cloruro de potasio (Figura 17e). La respuesta es de tendencia lineal positiva; aunque con rendimientos no mayores de 22 t ha⁻¹, en las parcelas donde se incrementó las dosis de kieserita sin aplicación de superfosfato triple y manteniendo constante el cloruro de potasio en 2000 g planta⁻¹ (Figura 17f).

El rendimiento presenta una tendencia cuadrática en las parcelas tratadas con dosis crecientes de kieserita. Pero, sin aplicar superfosfato triple y

manteniendo el cloruro de potasio en $4000 \text{ g planta}^{-1}$, el rendimiento promedio es mayor (20.4 t ha^{-1}) que cuando no se aplica el cloruro de potasio pero si 750 g de superfosfato triple (17.7 t ha^{-1}) (Figuras 18a y 18b). Con incrementos de kieserita, manteniendo constante el superfosfato triple y el cloruro de potasio en 750 y $2000 \text{ g planta}^{-1}$, respectivamente la respuesta tuvo una tendencia cuadrática con una marcada reducción del rendimiento (18.9 t ha^{-1}) a la dosis media de kieserita. Sin embargo, solo al incrementar a $1500 \text{ g planta}^{-1}$ el superfosfato triple, la respuesta se torna lineal con un rendimiento máximo de 26.8 t ha^{-1} a la dosis mas elevada de la kieserita (Figuras 18c y 18d). Al incrementar simultáneamente las dosis del superfosfato triple junto a las dosis de cloruro de potasio, con 0 y $3000 \text{ g planta}^{-1}$ de kieserita se obtuvo una respuesta cuadrática y lineal, respectivamente. En el primer caso, se logra un rendimiento máximo de 21.4 t ha^{-1} a la dosis media de ambos fertilizantes (superfosfato triple y kieserita); en el segundo caso, la respuesta del rendimiento llega a un nivel máximo de 22.9 t ha^{-1} con las dosis mas altas de ambos fertilizantes (Figuras 18e, 18f).

Los incrementos simultáneos de los fertilizantes superfosfato triple y kieserita sin aplicación de cloruro de potasio, produjo una superficie de respuesta lineal con un rendimiento máximo de 20.3 t ha^{-1} a las dosis mas altas de ambos fertilizantes (Figura 19a); al incrementar el cloruro de potasio a $2000 \text{ g planta}^{-1}$, la respuesta del rendimiento, también lineal, llega a un máximo de 22.9 t ha^{-1} a las dosis mas altas de ambos fertilizantes (Figura 19b); sin embargo, al duplicar el cloruro de potasio a $4000 \text{ g planta}^{-1}$, el rendimiento llega a un máximo de 23.6 t ha^{-1} a las dosis medias de ambos fertilizantes y decrece hasta 19.7 t ha^{-1} en las dosis mas altas de los fertilizantes superfosfato triple y kieserita (Figura 19c).

Una tendencia muy parecida se observó cuando se incrementa simultáneamente el cloruro de potasio y la kieserita. Sin aplicación de superfosfato triple, existe una tendencia lineal cuyo rendimiento máximo es de 20.4 t ha^{-1} a las dosis más altas de ambos fertilizantes (Figura 19d). Con $750 \text{ g planta}^{-1}$ de superfosfato triple la respuesta, también lineal, alcanza un rendimiento de 23.6 t ha^{-1} con las dosis mas elevadas de ambos fertilizantes (Figura 19e); pero al duplicar la dosis del superfosfato triple a $1500 \text{ g planta}^{-1}$ la tendencia se vuelve cuadrática con un rendimiento máximo de 22.9 t ha^{-1} a dosis intermedias de ambos fertilizantes (Figura 19f).

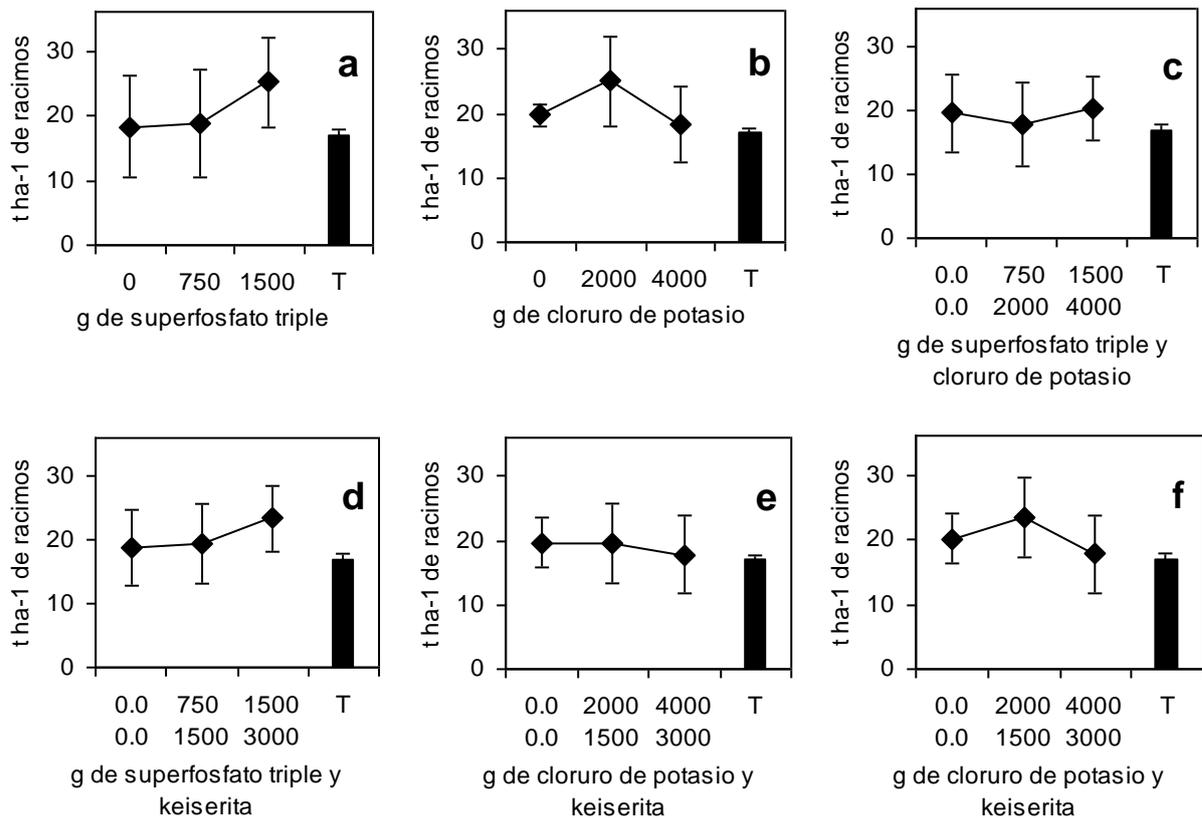


Figura 15. Superficie de respuestas significativas ($p < 0.01$) del rendimiento de racimos de palma aceitera ($t\ ha^{-1}$) sin aplicación de urea. (a) Incrementando la dosis de superfosfato triple, pero manteniendo constante el cloruro de potasio y la kieserita en 2000 y 3000 $g\ planta^{-1}$, respectivamente; (b) Incrementando la dosis de cloruro de potasio, pero manteniendo constante el superfosfato triple y la kieserita en 1500 y 3000 $g\ planta^{-1}$, respectivamente; (c) Incrementando simultáneamente las dosis de superfosfato triple y de cloruro de potasio, pero manteniendo constante la kieserita en 1500 $g\ planta^{-1}$; (d) Incrementando simultáneamente las dosis de superfosfato triple y de kieserita, pero manteniendo constante el cloruro de potasio en 2000 $g\ planta^{-1}$; (e) Incrementando simultáneamente las dosis de cloruro de potasio y de kieserita, pero manteniendo constante el superfosfato triple en 750 $g\ planta^{-1}$; (f) Incrementando simultáneamente las dosis de cloruro de potasio y de kieserita, pero manteniendo constante el superfosfato triple en 1500 $g\ planta^{-1}$. La barra oscura representa el rendimiento del testigo sin-fertilización. Las líneas verticales representan el error estándar.

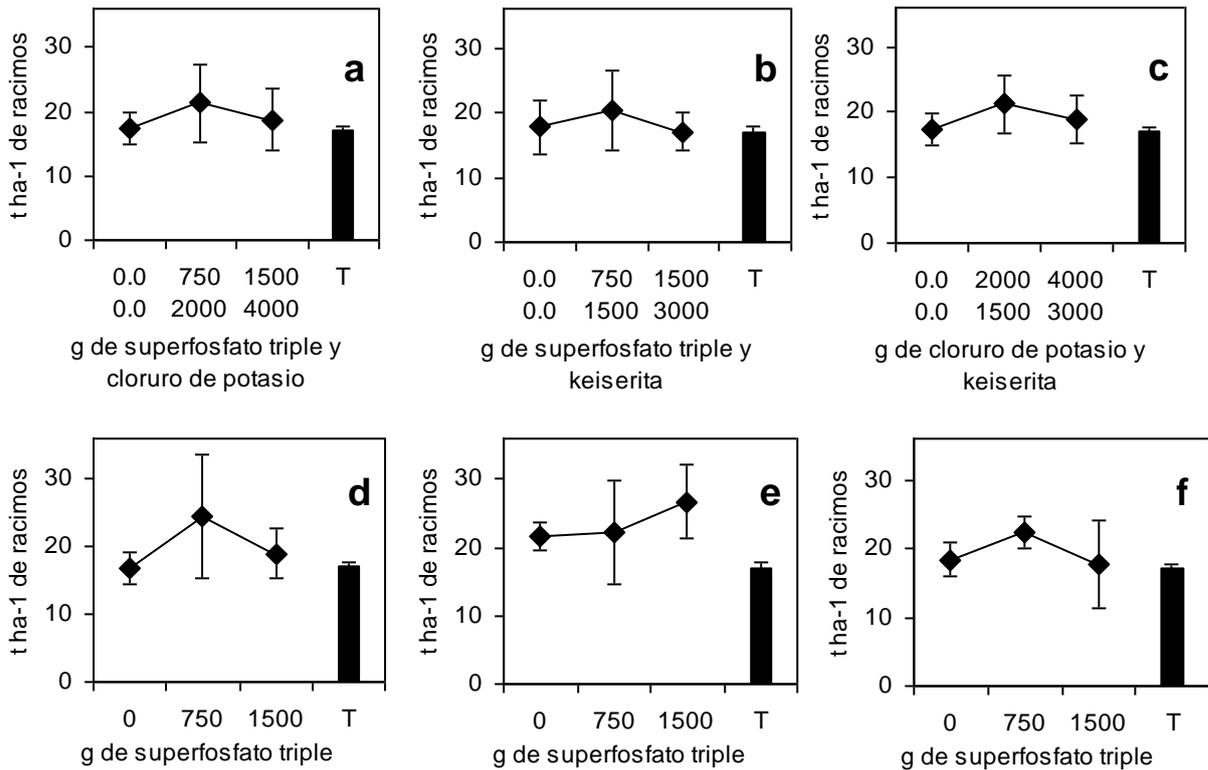


Figura 16. Superficie de respuestas significativas ($p < 0.01$) del rendimiento de racimos de palma aceitera ($t\ ha^{-1}$) cuando se aplicó $1500\ g\ planta^{-1}$ de urea. **(a)** Incrementando simultáneamente la dosis de superfosfato triple y cloruro de potasio sin aplicación de kieserita; **(b)** Incrementando simultáneamente la dosis de superfosfato triple y de kieserita sin aplicación de cloruro de potasio; **(c)** Incrementando las dosis de cloruro de potasio y de kieserita sin aplicación de superfosfato triple; **(d)** Incrementando la dosis de superfosfato triple, pero manteniendo constante el cloruro de potasio en $2000\ g\ planta^{-1}$ sin aplicación de kieserita; **(e)** Incrementando la dosis de superfosfato triple, pero manteniendo constante el cloruro de potasio y la kieserita en 750 y $3000\ g\ planta^{-1}$, respectivamente; **(f)** Incrementando la dosis de superfosfato triple, pero manteniendo constante el cloruro de potasio en $4000\ g\ planta^{-1}$ sin aplicación de kieserita. La barra oscura representa el rendimiento del testigo sin-fertilización. Las líneas verticales representan el error estándar.

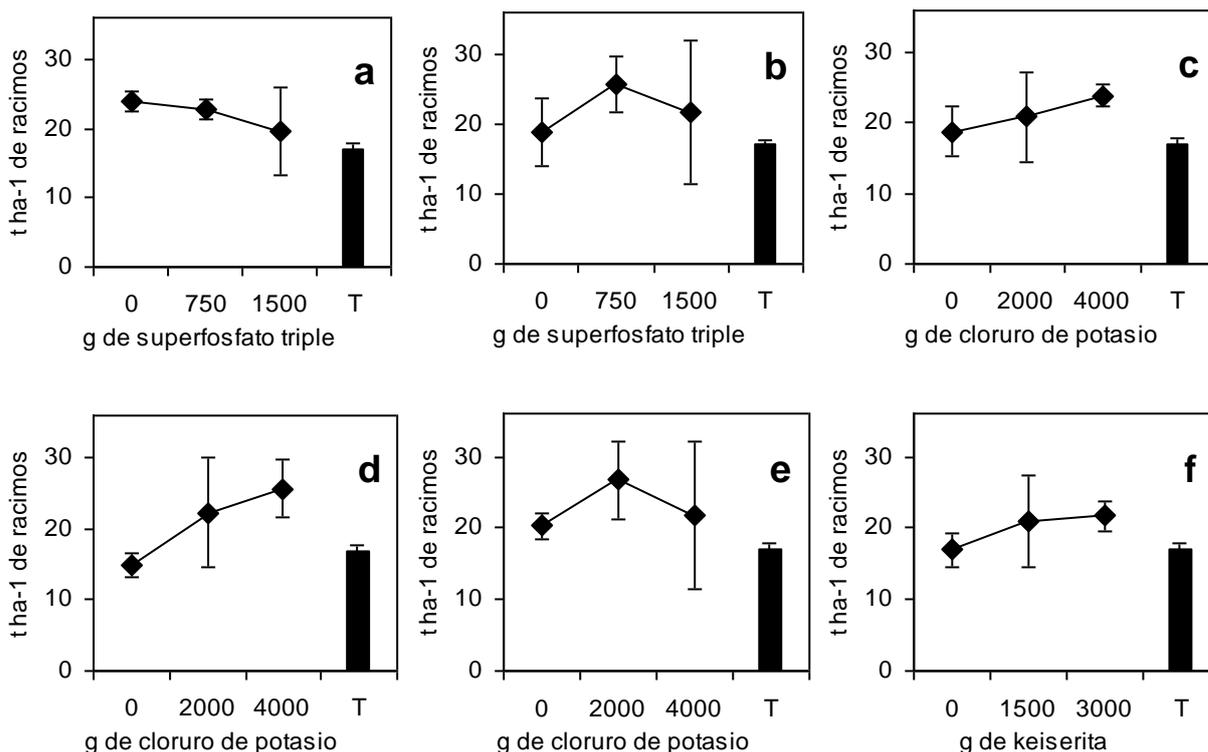


Figura 17. Superficie de respuestas significativas ($p < 0.01$) del rendimiento de racimos de palma aceitera ($t\ ha^{-1}$) cuando se aplicó $1500\ g\ planta^{-1}$ de urea. (a) Incrementando la dosis de superfosfato triple, pero manteniendo constante el cloruro de potasio y la kieserita en 4000 y $1500\ g\ planta^{-1}$, respectivamente; (b) Incrementando la dosis de superfosfato triple, pero manteniendo constante el cloruro de potasio y la kieserita en 4000 y $3000\ g\ planta^{-1}$, respectivamente; (c) Incrementando la dosis de cloruro de potasio sin aplicación de superfosfato triple, pero con una dosis constante de kieserita a $1500\ g\ planta^{-1}$; (d) Incrementando la dosis de cloruro de potasio, pero manteniendo constante el superfosfato triple y la kieserita en 750 y $3000\ g\ planta^{-1}$, respectivamente; (e) Incrementando la dosis de cloruro de potasio, pero manteniendo constante el superfosfato triple y la kieserita en 1500 y $3000\ g\ planta^{-1}$, respectivamente; (f) Incrementando la dosis de kieserita sin aplicación de superfosfato triple, pero manteniendo constante el cloruro de potasio en $2000\ g\ planta^{-1}$. La barra oscura representa el rendimiento del testigo sin-fertilización. Las líneas verticales representan el error estándar.

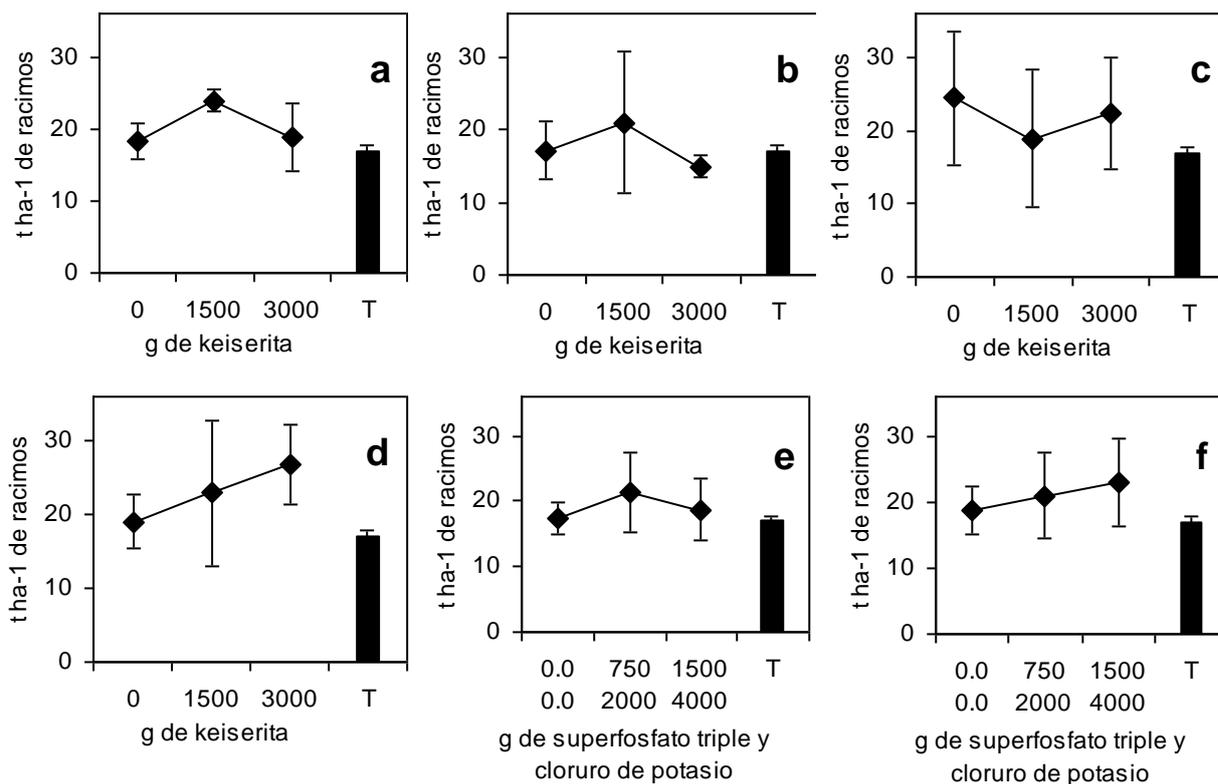


Figura 18. Superficie de respuestas significativas ($p < 0.01$) del rendimiento de racimos de palma aceitera ($t\ ha^{-1}$) cuando se aplicó $1500\ g\ planta^{-1}$ de urea. **(a)** Incrementando la dosis de kieserita sin aplicación de superfosfato triple, pero manteniendo constante el cloruro de potasio en $4000\ g\ planta^{-1}$, respectivamente; **(b)** Incrementando la dosis de kieserita, pero manteniendo constante el superfosfato triple a $750\ g\ planta^{-1}$ sin aplicación de cloruro de potasio; **(c)** Incrementando la dosis de kieserita, pero manteniendo constante el superfosfato triple y el cloruro de potasio en 750 y $2000\ g\ planta^{-1}$, respectivamente; **(d)** Incrementando la dosis de kieserita, pero manteniendo constante el superfosfato triple y el cloruro de potasio en 1500 y $2000\ g\ planta^{-1}$, respectivamente; **(e)** Incrementando simultáneamente las dosis de superfosfato triple y de cloruro de potasio sin aplicación de kieserita; **(f)** Incrementando simultáneamente las dosis de superfosfato triple y de cloruro de potasio, pero manteniendo constante la kieserita en $3000\ g\ planta^{-1}$. La barra oscura representa el rendimiento del testigo sin-fertilización. Las líneas verticales representan el error estándar.

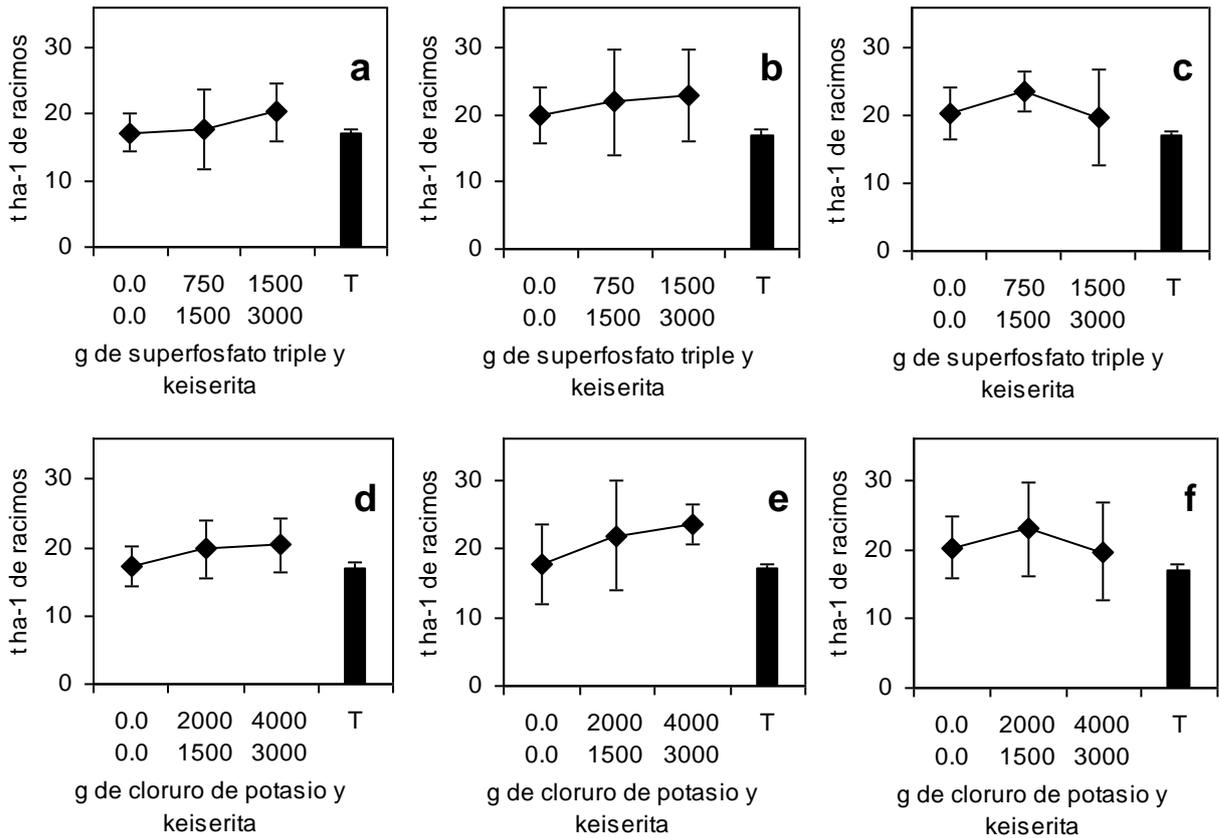


Figura 19. Superficie de respuestas significativas ($p < 0.01$) del rendimiento de racimos de palma aceitera ($t \text{ ha}^{-1}$) cuando se aplicó $1500 \text{ g planta}^{-1}$ de urea. (a) Incrementando simultáneamente las dosis de superfosfato triple y de kieserita sin aplicación de cloruro de potasio; (b) Incrementando simultáneamente las dosis de superfosfato triple y de kieserita manteniendo constante el cloruro de potasio en $2000 \text{ g planta}^{-1}$; (c) Incrementando simultáneamente las dosis de superfosfato triple y de kieserita manteniendo constante el cloruro de potasio en $4000 \text{ g planta}^{-1}$; (d) Incrementando simultáneamente las dosis de cloruro de potasio y de kieserita sin aplicación de superfosfato triple; (e) Incrementando simultáneamente las dosis de cloruro de potasio y de kieserita, pero manteniendo constante el superfosfato triple en $750 \text{ g planta}^{-1}$; (f) Incrementando simultáneamente las dosis de cloruro de potasio y de kieserita pero manteniendo constante el superfosfato triple en $1500 \text{ g planta}^{-1}$. La barra oscura representa el rendimiento del testigo sin-fertilización. Las líneas verticales representan el error estándar.

V. DISCUSIONES

5.1 Estatus de las propiedades químicas y físicas del suelo.

Los valores de las propiedades químicas y físicas del suelo medidas en la plantación a nivel superficial y subsuperficial, en las calicatas de diagnóstico y en la comparación entre los años 1980 y 1997, muestran que los parámetros varían fuertemente dentro del campo. A nivel superficial y subsuperficial, los coeficientes de variación (CV) más bajos (1 – 8%) se observaron para el pH, contenido de N, y CE, medios (16 – 49%) para el contenido de Mg y altos (>50%) para el contenido K y P y la textura del suelo. En las calicatas, la tendencia es parecida, el pH se mantuvo con un CV bajo, aunque el contenido de K se redujo a medio comparado al muestreo a nivel superficial y subsuperficial y los CV para MO, Mg, Ca y CIC se mantuvieron en valores medios. Los CV altos fueron para el contenido de P, Al+H y especialmente para la textura del suelo. Estos resultados, no deben sorprendernos ya que las variables químicas y físicas de un suelo son el resultado de una variación intrínseca de las mismas propiedades y de las prácticas de manejo que se producen en ella (Schlindwein and Anghinoni, 2000; Mallarino *et al.*, 1999). El análisis de los datos obtenidos del muestreo superficial, subsuperficial y en calicatas mediante la estadística clásica, no mostró la fuerte distribución agregada (en parches) de algunos parámetros del suelo y dio valores medios que produjeron CV medios y altos para la mayoría de las variables estudiadas. Estas mismas tendencias fueron encontradas por Cambardella and Karlen (1999), Lopez-Granados *et al.* (2002) y Geypens *et al.* (1999).

El pH del suelo, fue significativamente más ácido a nivel superficial, esta misma tendencia se observó en el muestreo en perfiles donde el nivel de pH a una profundidad de 0-20 cm fue significativamente más alta que a profundidades de 40->90 cm. Esta tendencia se debe a que la mayor actividad de absorción de las raíces, la acción de los fertilizantes acidificantes como la urea o el cloruro de potasio así como la lixiviación de los cationes básicos se producen en la capa superficial del suelo (von Uexküll and Mutert, 1995).

Por otro lado, los contenidos de N, P, K y el nivel de CE fueron significativamente más altos a nivel superficial del suelo, coincidiendo con el

contenido significativamente más alto de MO y de K en los horizontes superficiales de las calicatas. Estos mismos resultados reportan Goh *et al.* (1993) y Khalid *et al.* (2000) en cultivos con programas intensivos de aplicaciones de fertilizantes como la palma aceitera. Los altos contenidos de MO en los horizontes superficiales probablemente se deben a las aplicaciones constantes de restos de cosecha dentro de la plantación, una actividad común en el cultivo de palma aceitera (Chiew and Rahman, 2002).

Comparando los contenidos en el suelo de N, P, K y Mg después de 17 años de uso continuo, el N muestra una significativa reducción ($p < 0.05$). Muchos estudios realizados en los trópicos han demostrado que se producen considerables pérdidas de MO en el suelo (fuente de N) después de transformar un ecosistema de bosque primario en un sistema de cultivo perenne como palma aceitera (Ollagnier *et al.*, 1978) o cacao (Ahenkorah *et al.*, 1987) entre las razones principales citan el incremento de las tasas de mineralización de la MO del suelo causado por el cultivo, incremento de la temperatura del suelo debido a la exposición del suelo descubierto e incremento de los ciclos húmedos y secos. La MO también puede perderse por la erosión del suelo (Palm *et al.*, 2001) o por las aplicaciones continuas de fertilizantes nitrogenados (Pieri, 1989). Nuestros resultados demuestran que en un periodo de 17 años el contenido de N en el suelo se redujo a la mitad a pesar que en promedio las plantas de palma fueron fertilizadas con $870 \text{ g planta}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de urea.

Por otro lado, el nivel de P en 17 años de uso del suelo se incrementó en 172%; contrario al N, el P del suelo es enteramente derivado de minerales primarios, mayormente apatita. Debido a la naturaleza de los suelos aluviales, es común la deficiencia de P, especialmente en los trópicos húmedos (Fairhurst *et al.*, 1999). Por lo tanto, una tasa promedio de aplicación de fertilizantes fosfatados de $704 \text{ g planta}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ha logrado suplir esta deficiencia e incrementar 3 veces el nivel de P en el suelo. Sivanadyan and Norhayati (1992) demostraron que con la conversión de un bosque natural a plantaciones comerciales de palma aceitera, la disponibilidad del P se incrementó de 3 ppm para 0-15 cm de profundidad a 36 ppm después de seis años de cultivo. Este incremento en la disponibilidad del P fue como consecuencia de las prácticas de fertilización estándar que involucra la

aplicación de roca fosfórica a razón de $400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Sivanadyan and Norhayati, 1992); sin embargo, no todo el P medido en el suelo está disponible para la planta, porque puede ocurrir precipitaciones con el calcio o el aluminio, dependiendo de la reacción del suelo (Mott, 1988). Por su lado, el K y el Mg también se incrementaron en 72 y 67%, respectivamente. Los suelos tropicales ácidos se caracterizan por tener bajos valores de CIC y correspondientemente bajos contenidos de potasio y magnesio al iniciar su explotación (Schroth *et al.*, 2003). Sin embargo, la aplicación de fertilizantes inorgánicos como fuentes de K y Mg fácilmente suplen las necesidades iniciales del cultivo, aunque los tenores aplicados de cloruro de potasio y kieserita fueron de 1751 y 962 g planta⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Aun se percibe un deficiente contenido de K en gran parte del campo.

5.2 Estructura espacial de las propiedades del suelo.

Con respecto al análisis geoestadístico, la función semivariograma prueba la hipótesis nula de que las variables del suelo no muestran dependencia espacial a una distancia de separación elegida (en nuestro caso, 1000 m). Los semivariogramas isotrópicos fueron los que mejor ajustaron a los datos de las propiedades químicas y físicas estudiadas en ambos horizontes de muestreo coincidiendo con las recomendaciones de Goovaerts (1998), esto significa que el patrón de correlación es semejante en todas direcciones. Los semivariogramas resultantes indicaron la existencia de moderada a fuerte dependencia espacial para todas las propiedades físicas y químicas del suelo en cada horizonte medido (Cambardella and Karlen, 1999) y los valores bajos de la variancia en el origen (efecto pepita) para todas las variables estudiadas, sugieren que el intervalo de muestreo fue apropiado para reflejar la variación en el contenido de las propiedades del suelo en estudio (Nielsen, 1998).

Cuando la distribución de las propiedades del suelo posee una correlación espacial fuerte o moderada, la extensión promedio de estos agregados o parches esta dado por el rango del semivariograma (Trangmar *et al.*, 1985; Goovaerts, 1998). Aunque no hubo diferencias muy grandes entre los rangos de las diferentes variables del suelo, excepto por el P y Mg, siempre fue superior a 1000-m indicando la presencia de una estructura espacial mayor que la distancia

promedio de muestreo (Goovaerts, 1998). Las altas variaciones entre el valor del rango en los horizontes superficial y subsuperficial para el contenido de Mg y P indican que la distribución espacial de ambos elementos sufrieron cambios drásticos debido a las prácticas de manejo como la incorporación de fertilizantes que causan mayor disturbio en el horizonte superficial (Upchurch and Edmonds, 1991). Muchos estudios han encontrado fuertes variaciones en el tamaño del rango del semivariograma de las propiedades químicas y físicas del suelo (Cambardella *et al.*, 1994; Robsertson *et al.*, 1997; Iqbal *et al.*, 2005).

Finalmente, las propiedades del suelo en estudio, mostraron patrones espaciales consistentes y no consistentes con respecto a la profundidad de muestreo. Algunas variables como el pH y el P poseían diferente distribución espacial en cada profundidad, el pH mostró fuerte agregación en el horizonte superficial y moderada agregación a nivel subsuperficial; por el contrario, el contenido de P, mostró fuerte agregación en ambos horizontes, pero diferente tendencia y rango. Cambardella and Karlen (1999) y Lopez-Granados *et al.* (2002) reportaron distribuciones espaciales consistentes y no consistentes, para varias propiedades químicas, de acuerdo a la profundidad de muestreo. Ellos hipotetizaron que las variaciones intrínsecas y de manejo de la plantación pueden controlar el grado de dependencia espacial de las variables químicas del suelo. Al mismo tiempo, muchas características del suelo, especialmente las propiedades físicas, mostraron una tendencia semejante a ambas profundidades de muestreo, un reciente reporte (Iqbal *et al.*, 2005) demostró que las tendencias espaciales de las propiedades físicas del suelo difícilmente varían en los primeros 50 cm de profundidad de un suelo aluvial.

5.3 Distribución espacial del rendimiento de racimos y de las propiedades del suelo.

Los rendimientos de palma aceitera más bajos (<14.9 - <19.4 t ha⁻¹) se observaron en la parte nor-oeste del campo coincidiendo con los suelos, clasificados por Olivin (1983), de tipo 2 + 3 (erosión mediana a muy fuerte). Por obvias razones, estos suelos presentan características menos ventajosas para la producción de un cultivo (McDonald *et al.*, 2003). Adicionalmente, las áreas que muestran los rendimientos más bajos concuerdan con niveles bajos del pH del

suelo y nutrientes como el N, P, K y Mg especialmente a nivel superficial. Asimismo, estas áreas recibieron, en promedio, las siguientes dosis de fertilizantes (urea: 750 – 1,000, superfosfato triple: 400 – 750, cloruro de potasio: 1000 – 2500 y kieserita: 750 – 1000 g planta⁻¹). Por el contrario, los niveles mas altos (>21.6 - >25.4 t ha⁻¹) de producción se observan en la parte central del campo coincidiendo con los suelos de tipo 0 + 1 (sin erosión a leve erosión) que corresponden a las áreas con mas alto contenido de Li, pero bajos porcentajes de Ao. Adicionalmente, las áreas con mayor producción coinciden con las zonas que recibieron altas dosis de fertilizantes (urea: 750 – 1000, superfosfato triple: 750 – 1500, cloruro de potasio: 1250 – 2500 y kieserita: 1300 – 1700 g planta⁻¹).

En cuanto a las propiedades químicas del suelo, el pH medido en ambas profundidades, muestra una gradiente uniforme de reducción desde la parte sur-este del campo hacia la parte nor-oeste, siendo más marcada en el horizonte subsuperficial. Aunque esta gradiente es marcada, los niveles de pH variaron muy poco >4.48 - >5.58 en el horizonte superficial y >4.62 - >5.43 en el horizonte subsuperficial. En un estudio de variabilidad del pH a dos profundidades de muestreo, en campos bajo tres sistemas de cultivo, se encontró una baja variabilidad del pH, pero con dependencia espacial moderada (Porto de Carvalho *et al.*, 2002). Por el contrario, Ponce de León *et al.* (1999) encontraron una variabilidad en el pH puramente al azar sin dependencia espacial en un suelo calacarc cambisol cultivado con caña de azúcar.

Aunque, el contenido espacial de N en el campo en estudio, mostró niveles bajos a muy bajos para los requerimientos de palma aceitera (von Uexküll and Fairhurst, 1991). Se observa una gradiente de reducción uniforme desde el este al oeste del campo en ambos horizontes, sin la existencia de agregados muy marcados. Esta tendencia espacial coincide con el historial de las aplicaciones de urea y con la clasificación de Olivin (1983) donde los suelos con menos erosión, presenta los mas altos niveles de N. Por otro lado, los bajos contenidos de N en el suelo a pesar de las altas aplicaciones de fertilizantes nitrogenados, puede ser explicada por la extracción del cultivo mismo, las palmeras de aceite necesitan grandes cantidades de N (Werkhoven, 1967), procesos de desnitrificación (Barton

et al., 1999) y por volatilización del amonio desde la superficie aplicada después de la fertilización, especialmente de urea (Schroth *et al.*, 2003).

En cuanto al contenido de P en el suelo, en el horizonte superficial se observó tres agregados. Dos de ellos se ubicaron en la parte oeste del campo y un agregado muy grande se ubicó en la parte central del campo que va de norte a sur. En el horizonte subsuperficial, la tendencia es mas uniforme aunque existen muchos agregados destaca especialmente uno ubicado en la parte nor-este del campo. Huang *et al.* (1999) en un estudio de variabilidad espacial del P, a dos profundidades de muestreo y a lo largo de dos transectos (uno ubicado en un suelo intensivamente cultivado y otro en un suelo sin cultivo por 10 años). Encontró una tendencia lineal en ambos tipos de suelo y en ambas profundidades; aunque, los datos mostraron una alta variabilidad. Por otro lado, los agregados o parches del contenido de P significativamente más grandes en el horizonte superficial (el valor del rango del semivariograma es 4.5 veces mas grande) demuestran que este elemento posee poca movilidad dentro del perfil del suelo. Según Schroth *et al.* (2003) los resultados del análisis de P son grandemente afectados por la posición del punto de muestreo tanto horizontal como vertical debido a que el P inorgánico es muy inmóvil en el suelo.

No se encontró ninguna relación entre las cantidades de superfosfato triple aplicado y los niveles de P medidos en el suelo. Asimismo, el contenido del P, para los requerimientos de palma aceitera, fue bajo y muy bajo en ambos horizontes muestreados. A pesar de que la palmera aceitera requiere de P en cantidades más pequeñas que el N, las extracciones por las cosechas de racimos pueden reducir significativamente el nivel de P disponible en el suelo (Werkhoven, 1967).

El K, al igual que el P, también muestra una marcada agregación. Sin embargo, a diferencia del P, los niveles mas bajos se observan en el horizonte superficial. Couto *et al.* (1997) encontraron que la cantidad de K intercambiable en el suelo esta fuertemente influenciado por el manejo y el tipo de suelo, especialmente en el horizonte A. Al igual que nuestros resultados, ellos encontraron fuerte dependencia espacial del K, aunque revelaron variaciones

anisotrópicas (Couto *et al.*, 1997). Las agregaciones de altos contenidos de K coinciden con áreas del campo donde se fertilizaron altas dosis de cloruro de potasio. A pesar que en promedio se aplicaron $1751 \text{ g planta}^{-1} \text{ año}^{-1}$, en todo el campo, los niveles de K en el suelo se clasificaron como bajos y medios. Una de las razones para que se produzca esta marcada deficiencia en el suelo, probablemente sea las altas cantidades que extrae una planta de palmera en la producción de aceite (Werkhoven, 1967).

El contenido de Mg en el horizonte superficial y subsuperficial, muestra agregados bien marcadas coincidentes. Y las áreas con Mg más alto coinciden con las áreas de bajos porcentajes de Ao, pero altos de Li. Estos resultados coinciden con los reportes de Havlin *et al.* (1999) quienes afirman que en suelos con altos contenidos de Ao, se producen considerables pérdidas de Mg por lixiviación después de aplicar fertilizantes como el cloruro de potasio o sulfato de potasio. En el horizonte subsuperficial, en general los contenidos de Mg son más altos que en el horizonte superficial, esto podría estar indicando un proceso de deposición de Mg en los horizontes más profundos o una fijación por las Ar contenidas en mayor proporción en horizontes inferiores (Pieri, 1989). De acuerdo a los requerimientos de palma aceitera, los contenidos de Mg en ambos horizontes varían desde moderados a altos. Probablemente la disponibilidad de Mg en el suelo, a niveles moderados y altos, se debe a las aplicaciones constantes de kieserita ($962 \text{ g planta}^{-1}$) la cual es fácilmente soluble (Ibrahim, 2001) y los racimos de palma no extraen elevadas cantidades de Mg como el N o K (Werkhoven, 1967).

La CE en ambos horizontes muestra fuerte agregación. Aunque el contenido en todo el campo y en ambos horizontes se encontró dentro del rango normal a niveles típicos de un suelo tropical. En el horizonte superficial destaca un agregado que se extiende desde la parte norte hacia el sur pero en el lado este del campo ($>0.28 - >0.60 \text{ mmhos cm}^{-1}$). En cambio, en el horizonte subsuperficial un agregado de menor tamaño se presenta en la parte central del campo. Dentro de los factores que influyen en la variabilidad de la CE, especialmente en suelos no-salinos como el nuestro, destacan la textura del suelo, el contenido de humedad y la CIC (Williams and Baker, 1982; Rhoades *et al.*, 1999). El agregado

observado en el horizonte superficial coincide con el área que tiene mayor contenido de Li y Ar (Kachanoski *et al.*, 1988). Contrariamente, los valores más bajos coinciden con las zonas de mayor humedad (suelos neajales, aguajales y bajeales).

En cuanto a las propiedades físicas. El contenido de Ao formó agregados muy marcados en ambos horizontes, aunque en mayor grado en el horizonte superficial. Sin embargo, en el horizonte subsuperficial es notoria la presencia de un agregado muy extenso en la zona sur-oeste del campo. Iqbal *et al.* (2005) encontraron grandes agregados de Ao en horizontes profundos debido a procesos de deposición típicas de un suelo aluvial. El contenido de Li, también muestra una tendencia agregada en ambos horizontes. Los agregados de contenidos elevados de Li, coinciden con las zonas sin o erosión leve de acuerdo a la clasificación de Olivin (1980). En general, es fácil notar que existe una marcada relación negativa entre el contenido de Ao y Li y/o Ao con Ar. Consecuentemente, suelos con altos contenidos de Ao en la superficie y subsuperficie se encontraron en el sur-oeste del campo; mientras que altos contenidos de Li y Ar se encontraron en la zona nor-este del campo. La textura de los suelos difícilmente experimentan cambios aun con largos periodos de explotación; sin embargo, los cambios frecuentes en el contenido de Ao, Li y Ar se producen por pérdida de suelos, especialmente superficiales, debido a la erosión (McDonald *et al.*, 2003)

5.4 Análisis de variancia superficie de respuesta del experimento CP1.

El resultado de la prueba pareada de 't' entre las medias de las parcelas tratadas con fertilizantes versus las parcelas sin-fertilizantes, revela que los únicos tratamientos que lograron incrementos significativos ($p < 0.05$) en el rendimiento de frutos de palma aceitera, con respecto al testigo sin-fertilización, fueron: 0-4000-1500-1500, 750-4000-1500-1500 y 1500-2000-1500-0 g planta⁻¹ de superfosfato triple, cloruro de potasio, kieserita y urea, respectivamente. En promedio estas parcelas alcanzaron un rendimiento de 23.57 t ha⁻¹ de racimos de frutos de palma. En comparación al testigo sin-fertilizantes, el incremento del rendimiento fue de 38.6%. Destacan la presencia del cloruro de potasio (a 2000 y 4000 g planta⁻¹) y la kieserita (a 1500 g planta⁻¹) en todos los tratamientos, estos resultados coinciden con muchas investigaciones llevadas a cabo en Africa donde reportaron espectaculares respuestas a la aplicación de 1500 a 2000 g planta⁻¹ de cloruro de potasio en plantas jóvenes y adultas de palma aceitera (Werkhoven, 1967).

El análisis de superficie, permite detectar diferencias mas sutiles a nivel de interacciones bajo las diferentes combinaciones de las dosis ensayadas y diferentes nutrientes aplicados (Kuehl, 2000). En general, las respuestas a las aplicaciones de superfosfato triple, cloruro de potasio y kieserita, en ausencia de urea, mostraron solo seis interacciones altamente significativas ($p < 0.01$); mientras que, la aplicación de los mismos fertilizantes pero con $1500 \text{ g planta}^{-1}$ de urea, mostraron 24 respuestas altamente significativas. Estos resultados, demuestran el importante rol que juega el N en la nutrición de las plantas de palma aceitera (Werkhoven, 1967; von Uexküll and Fairhurst, 1991). Por ejemplo, incrementando las dosis de superfosfato triple (0, 750 y $1500 \text{ g planta}^{-1}$) manteniendo constante el cloruro de potasio y la kieserita en 2000 y $3000 \text{ g planta}^{-1}$, respectivamente el rendimiento máximo (25.1 t ha^{-1}) de frutos de palma aceitera se obtiene a la dosis mas alta del superfosfato triple. Pero, si se adicionan $1500 \text{ g planta}^{-1}$ de urea, el rendimiento máximo llega a 27 t ha^{-1} . Una tendencia semejante se observa cuando se va incrementando la dosis de cloruro de potasio (0, 2000 y $4000 \text{ g planta}^{-1}$) manteniendo al superfosfato triple y a la kieserita en 1500 y $3000 \text{ g planta}^{-1}$, respectivamente. El rendimiento máximo (25.1 t ha^{-1}) se obtiene a la dosis media del cloruro de potasio, pero al adicionar $1500 \text{ g planta}^{-1}$ de urea, el rendimiento llega a 26.8 t ha^{-1} .

Las respuestas a las combinaciones de las dosis de superfosfato triple x cloruro de potasio con 0 g planta^{-1} de kieserita, superfosfato triple x kieserita con 0 g planta^{-1} de cloruro de potasio y cloruro de potasio x kieserita con 0 g planta^{-1} de superfosfato triple, fueron significativas pero los rendimientos promedios no superaron las 20 t ha^{-1} . Aun aplicando $1500 \text{ g planta}^{-1}$ de urea. Estos resultados demuestran que la ausencia de cualquiera de los elementos (Mg, K y P) dentro del programa de fertilización no induce incrementos significativos del rendimiento (Ibrahim, 2001; Wherkhoven, 1967; Ramirez, 1989).

Nuestros resultados demuestran que se puede alcanzar rendimientos superiores a 26 t ha^{-1} combinando las siguientes dosis de fertilizantes: 1500 , 1500 , $2000-4000$ y $3000 \text{ g planta}^{-1}$ de urea, superfosfato triple, cloruro de potasio y kieserita, respectivamente.

VI. CONCLUSIONES

1. La mayoría de las propiedades del suelo, mostraron una distribución significativamente sesgada. Y después de 17 años de cultivo intensivo con palma aceitera, se ha reducido dramáticamente el N, pero se incrementó el P, K y el Mg; aunque, el P y K se encuentran a niveles deficientes para el cultivo.
2. Se ha encontrado una marcada relación espacial entre los antecedentes de aplicaciones de fertilizantes con el contenido actual de los principales nutrientes. Asimismo, el análisis geoestadístico permitió identificar el tamaño y la posición de los agregados o parches de las propiedades físicas y químicas estudiadas, sentando las bases para el establecimiento de un programa preciso de fertilización a fin de optimizar el uso y la efectividad de los fertilizantes.
3. El análisis de superficie de respuesta, demostró que las siguientes combinaciones de dosis de fertilizantes: 1500, 1500, 2000-4000 y 3000 g planta⁻¹ de urea, superfosfato triple, cloruro de potasio y kieserita, respectivamente. Fueron los que alcanzaron rendimientos superiores a 26 t ha⁻¹.

VII. RESUMEN

La caracterización de las propiedades físicas y químicas de un suelo sometido a intensivas aplicaciones de fertilizantes inorgánicos. Así como la comprensión del patrón de distribución espacial de las propiedades del suelo, son importantes para determinar las deficiencias del suelo en cuanto a nutrición y para establecer un eficiente esquema de manejo del recurso suelo. Debido a que la producción de un cultivo esta afectado por factores que varían en el espacio (variabilidad espacial) y el tiempo (variabilidad temporal). Este trabajo tuvo por objetivos realizar el estudio de la variabilidad espacial de las principales propiedades químicas y físicas de un suelo aluvial con cultivo intensivo de palma aceitera (*Elaeis guineensis*) cuya área de cultivo fue de 4,623 ha, ubicado en la cuenca del río Huallaga en la selva alta Peruana. Para ello, se estableció un muestreo, a dos profundidades, en cuadrículas de 1000-m en dirección oeste-este x 250-m en dirección sur-norte. Se colectaron un total de n=196 y 93 muestras en a nivel superficial y subsuperficial, respectivamente. Adicionalmente, se realizaron n=26 perfiles de diagnostico donde se clasificó tres profundidades de muestreo 0-20, 20-40 y 40-≤90 cm. A nivel superficial y subsuperficial, se caracterizó espacialmente el pH, contenido de nitrógeno (N, %), fósforo (P, ppm), potasio (K, ppm), magnesio (Mg, mg 100-g de suelo⁻¹), conductividad eléctrica (CE, mmhos cm⁻¹), arena (Ao, %), limo (Li, %) y arcilla (Ar, %). Todas las propiedades del suelo, excepto los contenidos de Li y Ar, mostraron una distribución no-normal altamente significativa y los coeficientes de variabilidad (CV, %) fueron bajos (pH, N y CE), medios (Mg) y altos (P, K, Ao, Li y Ar). Las pruebas de one-way ANOVA mostraron diferencias significativas entre los horizontes en el pH, N, P, K, CE, Ao y Ar. El análisis geoestadístico, ilustra que aunque existe de moderada a fuerte dependencia espacial, esta es completamente isotrópica y predominantemente por encima del efecto puramente de la variancia (efecto pepita). El tamaño de los agregados encontrados siempre estuvieron por encima del espaciamiento de muestreo, excepto para el P a nivel subsuperficial. Las funciones de semivariograma, después de ser validadas exitosamente, fueron utilizadas para generar mapas de contorno mediante el procedimiento de krigado permitiendo identificar el tamaño y la posición de los agregados o parches de las propiedades físicas y químicas estudiadas, sentando las bases para el establecimiento de un

programa de fertilización que optimice el manejo y los esquemas de fertilización en sitios específicos. Por otro lado, mediante análisis de superficie de respuesta, se buscó las mejores combinaciones de tres dosis (en g planta⁻¹) de fertilizantes [superfosfato triple (0, 750 y 1500), cloruro de potasio (0, 2000 y 4000) y kieserita (0, 1500 y 3000)] junto con dos dosis de urea (0 y 1500), bajo un diseño de bloques completamente al azar con parcelas divididas 3³x2. Los resultados demuestran que los rendimientos mas altos de frutos de palma aceitera (>26 t ha⁻¹) se logran con las siguientes combinaciones de los fertilizantes: 1500, 1500, 2000-4000 y 3000 g planta⁻¹ de urea, superfosfato triple, cloruro de potasio y kieserita, respectivamente.

VIII. LITERATURA CITADA

- Agamuthu, P., Chan, Y.K., Jesinker, R., Khoo, K.M., and W.J. Broughton. 1981. Effects of differently managed legumes on the early development of oil palm. *Agro Ecosystems* 6: 315-323.
- Ahenkorah, Y., Halm, B.J., Appiah, M.R., Akrofi, G.S., and J.E.K. Yirenyi. 1987. Twenty years' results from a shade and fertilizers trial on Amazon cocoa (*Theobroma cacao*) in Ghana. *Experimental Agriculture* 23: 31-39.
- Barton, L., McLay, C.D.A., Schipper, L.A., and C.T. Smith. 1999. Annual denitrification rates in agricultural and forest soils: a review. *Australian Journal of Soil Research* 37: 1073-1093.
- Bregt, A.K., Stoorvogel, J.J., Bounma, J., and A. Stein. 1992. Mapping ordinal data in soil survey: A Costa Rican example. *Soil Science Society of America Journal* 56: 525-531.
- Cambardella, C.A., and D.K. Karlen. 1999. Spatial analysis of soil fertility parameters. *Precision Agriculture* 1: 5-14.
- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Novak, J.M., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Turco, R.F., and A.E. Konopka. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal* 58: 1501-1511.
- Chan, K. W. 1982a. Potassium requirement of oil palm in Malaysia; fifty years of experimental results In: Phosphorus and Potassium in the Tropics. Pushparajah, E., Sharifuddin, H. A., and E. Hamid (eds.). Malaysian Society of Soil Science, Kuala Lumpur. pp: 395-423.
- Chan, K. W. 1982b. Phosphorus requirement of oil palm in Malaysia; fifty years of experimental results. In: Phosphorus and Potassium in the Tropics. Pushparajah, E., Sharifuddin, H.A., and E. Hamid (eds.). Malaysian Society of Soil Science, Kuala Lumpur. pp: 395-423.
- Chiew, L.K., and Z.A. Rahman. 2002. The effects of oil palm empty fruit bunches on oil palm nutrition and yield, and soil chemical properties. *Journal of Oil Palm Research* 14: 1-9.

- Coe, R., Huwe, B., and G. Schroth. 2003. Spatial structure and its analysis. In: Schroth, G., and F.L. Sinclair (eds) *Trees, Crops and Soil Fertility Concepts and Research Methods*. CABI Publishing, Wallingford, UK. pp. 39-76.
- Couto, E.G., Stein, A., and E. Klamt. 1997. Large area spatial variability of soil chemical properties in central Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 66:139-152.
- Fairhurst, T., Lefroy, R., Mutert, E., and N. Batjes. 1999. The importance, distribution and causes of phosphorous deficiency as a constraint to crop production in the tropics. *Agroforestry Forum* 9: 2-7.
- FAO, 2002. Statistics on 2001 oil palm production. FAOSTAT Database. On-line.
- Franzen, D.W., Hofman, V.L., Halvorson, A.D., and L.J. Cihacek. 1996. Sampling for site-specific farming: Topography and nutrient considerations. *Better Crops Plant Food* 80: 14-18.
- Gamma Design Software, 2005. GS+ Geostatistics for the Environmental Sciences delivery for Windows. Release 7.0. Gamma Design Software, LLC. Plainwell, Michigan, USA.
- Geypens, M., Vanongeval, L., Vogels, N., and j. Meykens. 1999. Spatial variability of agricultural soil fertility parameters in a Gleyic Podzol of Belgium. *Precision Agriculture* 1:319-326.
- Goh, K.J., Kee, K.K., and P.S. Chew. 1993. Soil fertility of some common soil in Sabah, Malaysia. In: Proceedings of the 1993 Malaysian Soil Science Society Annual Soil Conference, Penang, Malaysia. pp 80-90.
- Goovaerts, P. 1998. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbial and physico-chemical soil properties. *Biological Fertility Soils* 27: 315-334.
- Haan, C.T. 1997. *Statistical Methods in Hydrology*. Iowa State University Press. Ames.

- Hammond, M.W. 1994. Comparison of phosphorus and potassium utilization with conventional and variable fertility management. *Better Crops Plant Food* 78: 22-23.
- Hartley, C.W. 1977. *La Palma de Aceite*. Compañía Editorial Continental S.A. México. 958 p.
- Havlin, J.L., Beaton, J.D., J.D., Tisdale, S.L., and W.L. Nelson. 1999. *Soil Fertility and Fertilizers – an Introduction to Soil Management*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey. 499 p.
- Hew, C.K, and S.K. Ng. 1968. A general schedule for maturing oil palms in West Malaysia. *Planter* 44: 417-429.
- Hew, C.K., Ng, S.K., and K.P. Lim. 1973. The rationale of maturing oil palms and its economics in Malaysia. In: *Advances in Oil Palm Cultivation*, R.L. Wastie and D.A. Earp (eds.). Kuala Lumpur: Incorporated Society of Planters. pp 306-322.
- Huan, L.K. 1989. Trial on composting EFB of oil palm with and without prior shredding and liquid extraction, In: *International Palm Oil Development Conference*. PHORUM, Malaysia. pp: 217-224.
- Huang, S.W., and J.Y. Jin. 2002. Advances in the study of spatial variability of soil properties. *Soils Fertility* 1: 8-14.
- Huang, X., Skidmore, E.L., and G. Tibke. 1999. Spatial variability of soil properties along a transect of CRP and continuously cropped land. In: 10th International Soil Conservation Organization Meeting held May. 24-29 at Purdue University and the USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. 7 p.
- Ibrahim, R. 2001. Fertilisers for oil palm. *African Farming and Food Processing* No. 25:18-20.
- Iqbal, J., Thomasson, J.A., Jenkins, J.N., Owens, P.R., and F.D. Whisler. 2005. Spatial variability analysis of soil physical properties of alluvial soils. *Soil Science Society of America Journal* 69: 1-13.

- Isaaks, E.H., and R.M. Srivastava. 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York.
- Kachanoski, R.G., Gregorich, E.G., and I.J. Van Wesenbeeck. 1988. Estimating spatial variations of soil water content using non contacting electromagnetic inductive methods. *Canadian Journal of Soil Science* 68: 715–722.
- Khalid, H., Zin, Z.Z., and J.M. Anderson. 2000. Soil nutrient dynamics and palm growth performance in relation to residue management practices following replanting of oil palm plantations. *Journal of Oil Palm Research* 12: 25-45.
- Kitanidis, P.K. 1997. *Introduction to Geostatistics, Applications in Hydrogeology*. Cambridge University Press, New York. 249 p.
- Kravchenko, A., and D. Bullock. 1999. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agronomy Journal* 91: 393-400.
- Kuehl, R.O. 2000. *Design of Experiments* 2nd ed. Duxbury, Thompson Learning. 666 p.
- Lopez-Granados, F., Jurado-Expósito, M., Atenciano, S., Garcia-Ferrer, A., Sanchez de la Orden, M., and L. García-Torres. 2002. Spatial variability of agricultural soil parameters in southern Spain. *Plant and Soil* 246: 97-105.
- Mallarino, A.P., Oyarzabal, E.S., and P.N. Hinz. 1999. Interpreting within-field relationships between crop yields and soil and plant variables using factor analysis. *Precision Agriculture* 1: 15-26.
- Matheron, G. 1963. Principles of geostatistics. *Economic Geology* 58: 1246-1266.
- McBratney, A.B., and M.J. Pringle. 1999. Estimating average and proportional variograms of soil properties and their potential use in precision agriculture. *Precision Agriculture* 1: 219-236.
- McDonald, M.A., Lawrence, A., and P.K. Shrestha. 2003. Soil erosion. In: Schroth, G., and F.L. Sinclair (eds) *trees, Crops and Soil Fertility Concepts and Research Methods*. CABI Publishing, Wallingford, UK. pp. 325-343.

- Mekonnen, K., Buresh, R.J., Coe, R., and K.M. Kipleting. 1999. Root length and nitrate under *Sesbania seban*: vertical and horizontal distribution and variability. *Agroforestry Systems* 42: 265-282.
- Ministerio de Agricultura - Unidad de Desarrollo de la Amazonía. 2000. Plan Nacional de Promoción de la Palma Aceitera. Perú, 2000-2010. Lima, Peru.
- Ministerio de Agricultura-Oficina de Información Geográfica. 2002. Estadísticas Agrícolas 2001. Lima, Peru.
- Minitab Inc. 2000. Minitab Statistical Software for Windows. Release 13.1. Minitab Inc.
- Mott, C.J.B. 1988. Surface chemistry of soil particles. In: Wild, A. (ed.) *Russell's Soil Conditions and Plant Growth*. Logman, Harlow. pp. 239-281.
- Ng, S.K. 1970. Greater productivity of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) with efficient fertilizer practice. 9th Congress in Potash Institute. 357p.
- Ng, S.K. 1977. Review of oil palm nutrient and maturing: Scope for greater economy in fertilizer usage. *Oleagineux* 32: 197-209.
- Nielsen, D.R. 1998. College on soil physics: Applied time series analysis and geostatistical methods. International Center for Theoretical Physics, Italy.
- Oliver, M.A. 1992. Some novel geostatistical applications in soil science. In: Bárdossy, A. (ed.) *Geostatistical Methods: Recent Developments and Applications in Surface and Subsurface Hidrology*. UNESCO IHP-IV, Paris, pp. 142-153.
- Olivin, J. 1980. Proyecto Palma Aceitera. Palmas del Espino. Vol. I, La zona del proyecto. Colaboración Técnica.
- Ollagnier, M and R. Ochs. 1973. Interaction between nitrogen and potassium in the nutrition of tropical oil plants. *Oleagineux* 28: 493-508.
- Ollagnier, M., Lauzeral, A., Olivin, J., and R. Ochs. 1978. Evolution des sols sous palmeraie après défrichement de la forêt. *Oléagineux* 33: 537-547.

- Palm, C.A., Giller, K.E., Mafongoya, P.L., and M.J. Swift. 2001. Management of organic matter in the tropics: translating theory into practice. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 61: 63-75.
- Parkin, T.B. 1993. Spatial variability of microbial process in a soil – A review. *Journal Environment Quality* 22: 409-417.
- Pieri, 1989. Fertilité des Terres de Savanes. Ministere de la Coopération et du Développement and CIRAD-IRAT, Paris. 444 p.
- Ponce de León, D., Pablos, P., Balmaceda, C., y M. Henriquez. 1999. Variabilidad espacial del pH, fósforo y potasio en muestreos de suelos con fines de fertilidad en plantaciones de caña de azúcar. *Bioagro* 11: 3-11.
- Porto de Carvalho, J.R., da Silveira, P.M., and S.R. Vieira. 2002. Geostatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 37: 1151-1159.
- Rajaratnam, J.A. 1973a. The effect of boron deficiency on the yield of oil palms in Malaysia, In: *Advances in Oil Palm Cultivation*, R.L. Wastie and D.A. Earp (eds.). Kuala Lumpur: Incorporated Society of Planters. pp. 306-322.
- Rajaratnam, J.A. 1973b. Application, absorption and translocation of boron in oil palm. II. Age of palm, frequency of application and influence of N and K. *Experimental Agriculture* 8: 141-145.
- Ramirez, A. 1989. Fertilización de la palma aceitera. En: *Forum Desarrollo del Cultivo de la Palma Aceitera en la Amazonia Peruana*. 4 – 7 julio, Lima, Perú. pp 11-13.
- Rees, A.R., and P.B.H. Tinker. 1963. Dry-matter production and nutrient content of plantation oil palms in Nigeria I. Dry-matter production. *Plant and Soil* 19: 19-32.
- Rhoades, J.D, Chanduvi, F., and S.M. Lesch. 1999. Soil Salinity Assessment: Methods and Interpretation of Electrical Conductivity Measurements. FAO Irrigation and Drainage Paper 57. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy.

- Robertson, G.P., Klingensmith, K.M., Klug, M.J., Paul, E.A., Crum, J.R., and B.G. Ellis. 1997. Soil resources, microbial activity, and primary production across and agricultural ecosystem. *Ecology Applied* 7: 158-170.
- SAS Institute. 2000. SAS Systems for information delivery for Windows. Release 8.12. SAS Inst., Cary, NC.
- Schlindwein, J.A., and I. Anghinoni. 2000. Variabilidade espacial de atributos de fertilidade e amostragem de solo no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo* 24: 85-91.
- Schroth, G., Lehmann, L., and E. Barrios. 2003. Soil nutrient availability and acidity. In: Schroth, G., and F.L. Sinclair (eds.) trees, Crops and Soil Fertility Concepts and Research Methods. CABI Publishing, Wallingford, UK. pp. 93-130.
- Shapiro, S.S., and M.B. Wilk. 1965. An analysis of variance test for normality. *Biometrika* 52: 691-710.
- Sivanadyan, K., and M. Norhayati. 1992. Consequence of transforming tropical rain forest to oil palm plantations. *The Planter* 68: 547-567.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy, a Basic systems of soil classification for making and interpreting soil surveys. USDA Agricultural Handbook, 2nd ed. Natural Resources Conservation Service, vol. 436. US Department of Agricultura, Washington. 869 p.
- Tan, K.S. 1979. Root development of oil palm on inland soils of West Malaysia. In: Soil Physical Properties and Crop Production, R. Lal and D.J. Greenland (eds.). John Wiley & Co., NY. pp. 363-374.
- Tinker, P.B.H., and D. Smilde. 1963. Dry- matter production and nutrient content of plantation oil palms in Nigeria II. Nutrient content. *Plant and Soil* 19: 350-363.
- Trangmar, B.B., Yost, R.S., and G. Uehara. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy* 38: 45-93.
- Upchurch, D.R., and W.J. Edmonds. 1991. Statistical procedures for specific objectives In: Mausbach, M.J., and L.P. Wilding (eds.) Spatial Variabilities of

Soils and Landforms. SSA Spec. Publ. 28. 28. Soil Science Society of America. Madison, WI. pp. 73-88.

von Uexküll, H. R., and T. H. Fairhurst. 1991. Fertilizing for high yield and quality; the oil palm. IPI Bulletin No. 12. International Potash Institute. Switzerland. 79 p.

von Uexküll, H.R., and E.W. Mutert. 1995. Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant and Soil* 171: 1-15.

Webster, R. 1996. What is kringing?. *Aspects Applied Biology* 46: 57-66.

Webster, R., and T.M. Burgess. 1984. Sampling and bulking strategies for estimating soil properties in small regions. *Journal of Soil Science* 35: 127-140.

Werkhoven, J. 1967. Fertilización de la Palmera de Aceite. Trad., del alemán por L. López. Alemania. 58 p.

Williams, B.G., and G.C. Baker. 1982. An electromagnetic induction technique for reconnaissance surveys of soil salinity hazards. *Australasian Journal of Soil Research* 20: 107–118.

Wood, B.J. 1977. A review of current methods of dealing with palm mill effluent. *Planter* 17: 477-495.

Wood, B.J., Pillai, K.R., and J.A. Rajaratnam. 1979. Palm oil mill effluent disposal on land. *Agriculture Wastes* 1: 103-127.

XI. ANEXOS

Anexo 1. Comparativo del contenido de los principales nutrientes en el suelo entre los años 1980 y 1997.

Parcela	N (%)		P (ppm)		K (ppm)		Mg (meq/100 gr)	
	1980	1997	1980	1997	1980	1997	1980	1997
B14	0.21	0.11	6.30	6.70	39	96	0.31	0.50
B13	0.15	0.09	6.30	7.81	84	60	0.35	0.46
B12	0.31	0.06	0.60	9.17	89	89	0.14	0.44
B10	0.12	0.05	0.90	5.13	98	94	0.13	0.47
B8	0.07	0.09	2.70	18.44	39	99	0.18	0.21
D14	0.19	0.10	12.30	11.51	39	162	0.51	0.74
D12	0.09	0.08	1.80	13.64	78	171	0.48	0.58
D11	0.06	0.06	1.80	5.53	20	101	0.14	0.37
D10	0.16	0.04	4.80	7.04	49	36	0.17	0.30
D9	0.16	0.06	3.00	10.45	39	68	0.08	0.38
E11	0.10	0.06	2.40	4.79	39	177	0.12	0.35
E10	0.16	0.05	3.45	7.61	39	55	0.18	0.39
E8	0.12	0.07	0.60	11.28	39	89	0.17	0.39
E6	0.13	0.07	1.50	6.20	117	94	0.25	0.34
F12	0.09	0.08	1.80	12.32	59	114	0.33	0.39
F11	0.15	0.05	2.70	5.01	39	136	0.25	0.30
F9	0.15	0.06	4.05	6.25	59	82	0.53	0.41
F6	0.13	0.07	3.30	7.85	78	72	0.28	0.41
F8	0.14	0.08	2.40	13.23	29	112	0.11	0.30
G11	0.17	0.06	2.40	4.63	78	115	0.54	0.41
G9	0.12	0.06	4.95	6.59	54	127	0.14	0.27
G8	0.15	0.07	5.40	11.50	20	89	0.11	0.22
G7	0.07	0.07	2.85	15.48	20	82	0.31	0.34
G6	0.04	0.05	1.50	7.17	89	43	0.22	0.57
G5	0.15	0.07	3.00	5.03	117	94	0.50	0.63
H8	0.17	0.04	3.30	21.40	39	72	0.14	0.31
H7	0.14	0.06	3.60	10.60	84	91	0.36	0.38
C14	0.11	0.12	2.70	8.10	39	187	0.29	0.75
C12	0.09	0.08	2.40	12.11	29	77	0.14	0.42
C10	0.10	0.06	3.30	7.83	55	103	0.10	0.33
C9	0.11	0.07	2.70	11.02	29	86	0.11	0.24
D11	0.18	0.06	5.70	5.53	98	101	0.19	0.37
D7	0.26	0.08	4.20	4.78	89	109	0.14	0.31

	N (%)		P (ppm)		K (ppm)		Mg (meq/100 gr)	
	1980	1997	1980	1997	1980	1997	1980	1997
Prom.	0.14	0.07	3.35	9.14	57.91	99.49	0.24	0.40
CV (%)	39.65	26.43	65.43	44.79	49.49	35.81	57.68	32.51