

## Estudios seleccionados de agricultura de precisión en palma de aceite: un resumen de diez años\*

### Selected Precision Agriculture Studies in Oil Palm: A 10-Year Summary

**CITACIÓN:** Balasundram S. K. (2016). Estudios seleccionados de agricultura de precisión en palma de aceite: resumen de diez años. *Palmas* 37(Especial Tomo I), pp. 243-266.

**PALABRAS CLAVE:** agricultura de precisión, detección remota y proximal, modelación geoespacial, sistema de apoyo a las decisiones.

**KEYWORDS:** Precision agriculture, remote and proximal sensing, geospatial modeling system decision support.

\*Artículo original recibido en inglés y traducido por Adriana Arias de Hassan.



**SIVA KUMAR BALASUNDRAM**

Departamento de Tecnología Agrícola,  
Facultad de Agricultura,  
Universiti Putra Malaysia  
Department of Agriculture Technology,  
Faculty of Agriculture,  
Universiti Putra Malaysia  
skbal71@gmail.com

## Resumen

La agricultura de precisión (AP) conlleva una estrategia holística de gestión del campo que permite ajustar el uso de los insumos y los métodos de cultivo como semillas, fertilizantes, pesticidas, la aplicación del agua, selección de variedades, siembra, labranza y cosecha, para que correspondan a la diversidad de suelos, cultivos y otras características de los campos. La AP supone el mapeo y análisis de la variabilidad de los campos y asocia esta variabilidad con acciones de gestión, a diferencia de la agricultura convencional, que se basa en un tratamiento uniforme de todo el campo. La palma de aceite es una excelente candidata para la implementación de la AP, especialmente porque consume una gran cantidad de insumos químicos y físicos. Sin embargo, uno de los mayores obstáculos para implementar en detalle estas estrategias a la palma de aceite es la gran extensión de las plantaciones.

El desafío agronómico de mejorar la productividad depende de tres problemas principales: 1) la fertilización, 2) las prácticas de cultivo, como la densidad de siembra, la cobertura vegetal, la poda y el drenaje y 3) el control de plagas y enfermedades.

En este documento se presenta un resumen de diez años de estudios seleccionados de AP que se realizaron en las plantaciones de palma de aceite de Malasia e Indonesia. Estos estudios tratan sobre la variabilidad espacial de la fertilidad del suelo en una misma topografía, la eliminación de los efectos espaciales para mejorar la interpretación de los datos de las pruebas de fertilizantes, la elaboración de un protocolo de estimación no destructiva de la producción y la calidad del aceite, la evaluación de la densidad de repoblación mediante la detección remota, la variabilidad espacial del carbono orgánico del suelo en diferentes etapas de cultivo, la variabilidad espacial de la enfermedad de manchas anaranjadas, discriminación entre deficiencia de potasio y los síntomas de la enfermedad de manchas anaranjadas mediante la detección remota, los cálculos de producción de los racimos de fruta fresca mediante la detección remota, y el cálculo de la calidad y la producción de aceite de palma mediante detección proximal.

## Abstract

Precision Agriculture (PA) embodies a holistic field management strategy that allows adjustment of crop input use and cultivation methods, including seed, fertilizer, pesticide and water application, variety selection, planting, tillage and harvesting, to match varying soil, crop and other field attributes. PA involves mapping and analyzing field variability, and linking such variability to management actions. This contrasts with conventional agriculture that is based on uniform treatment(s) across a field. Oil palm is an excellent candidate for PA implementation simply because it consumes a large amount of chemical and physical inputs. However, a major constraint in implementing PA strategies on a detailed scale for oil palm is the typically large plantation size. The agronomic challenge of increasing oil palm yield productivity hinges on three primary issues: 1) fertilization, 2) cropping practices such as planting density, ground cover, pruning and drainage, and 3) pest and disease management. This paper presents a 10-year Abstract of selected PA studies carried out in Malaysian and Indonesian oil palm plantations. These studies are: spatial variability of soil fertility across topography, removal of spatial effects to improve interpretation of data from fertilizer trials, development of a non-destructive oil yield and oil quality estimation protocol, stand density assessment using remote sensing, spatial variability of soil organic carbon across different crop ages, spatial variability of orange spotting disease, discriminating between potassium deficiency and orange spotting disease symptoms using remote sensing, estimating fresh fruit bunch yields using remote sensing, and estimating palm oil quality and yield using proximal sensing.

□

## Introducción

La Agricultura de Precisión (AP) ofrece varios beneficios posibles en lo referente a rentabilidad, productividad, sostenibilidad, calidad del cultivo, protección ambiental, calidad de la vida en la plantación, seguridad alimentaria y desarrollo económico rural (Robert, 1999). Desde el punto de vista del operador de la plantación, probablemente el mayor incentivo para adoptar la AP es aumentar el rendimiento económico de la tierra y mejorar el ambiente. Por lo general,

en las decisiones sobre las prácticas agronómicas se toman en consideración los costos, los beneficios y los riesgos asociados. Emmot y cols. (1997) indicaron que las prácticas agronómicas tienen relación con una amplia gama de factores como el clima, la infraestructura, los suelos, la topografía y la distribución de la productividad, las necesidades de nutrientes, los insectos, las enfermedades y las malezas. La mayoría de estos factores generalmente presentan variabilidad

espacial. Por otro lado, factores como el clima, las necesidades de nutrientes, insectos, enfermedades, malezas y la distribución de la productividad, también pueden tener variabilidad temporal. Por consiguiente, los problemas principales a los que se ve abocado el operador de la plantación son: 1) determinar las causas principales de la variación, 2) considerar cuáles de ellas son controlables, 3) evaluar y priorizar las posibles actividades de manejo en términos de sus ventajas agronómicas o económicas.

Hay tres requisitos fundamentales para la AP: 1) la capacidad de identificar la localización de cada campo; 2) la capacidad de capturar, interpretar y analizar datos agronómicos a una escala y frecuencia adecuadas; 3) la capacidad de ajustar el uso de los insumos y las prácticas agronómicas para maximizar los beneficios de la ubicación de cada campo. Hay toda una serie de tecnologías como el sistema de posicionamiento global, la modelación geoespacial, el sistema de información geográfica, la detección remota y proximal, la aplicación de tasa variable, los monitores de productividad y los sistemas de apoyo a las decisiones que permiten satisfacer esas necesidades. Hay varias configuraciones de estas tecnologías que se ajustan a distintas operaciones en la AP. Los protocolos para la implementación de la AP se pueden reducir a tres pasos generales: 1) recabar información sobre la variabilidad, 2) procesar y analizar la información para evaluar la importancia de la variabilidad, 3) implementar el cambio en el manejo de los insumos. La AP se ciñe a un proceso cíclico tipificado por un sistema que se torna más inteligente por cada año en que se utiliza en la plantación.

El concepto de la AP no es nuevo en palma de aceite. Ng y Selvadurai (1967) habían promovido el estudio de los suelos, el uso de mapas del suelo para asignar los cultivos, y las prácticas especializadas de siembra conjuntamente con los datos de campo y ensayos experimentales para establecer recomendaciones de fertilizantes específicas para cada operación. Sin embargo, la principal limitación para recabar datos, planear e implementar el trabajo a una escala detallada para la palma de aceite es el gran tamaño de las plantaciones. A la fecha, muchas plantaciones están equipadas con mapas de suelos semidetallados a una escala que permite examinar a nivel de 10 hectáreas, y a nivel de series y fases de suelos. Según Chew

(1997), varias plantaciones que comprenden suelos más variados tienen mapas detallados con el doble de intensidad de examen. Se han identificado áreas de suelos problemáticos y se han levantado los mapas necesarios para permitir atención especial y medidas correctivas. Sin embargo, pocas tienen mapas del terreno, la forma de la tierra, las pendientes o mapas detallados de drenaje. El reto agronómico de incrementar la productividad de la palma se centra en tres problemas principales: 1) fertilización, 2) prácticas de cultivo como densidad de siembra, cobertura del suelo, poda y drenaje, y 3) el manejo de plagas y enfermedades (Chew, 1997). Hay evidencia considerable en el sentido de que los rendimientos de la palma de aceite son muy variables y esa variabilidad se debe a las variaciones de las propiedades del suelo, los atributos de la palma, la precipitación y la historia de cultivo (Foster y Tarmizi, 1988, Chew y Pushparajah, 1995).

Este artículo es un resumen de estudios seleccionados sobre AP realizados en plantaciones de palma de aceite de Malasia e Indonesia durante los últimos diez años. Estos estudios se examinarán categóricamente con base en la plataforma tecnológica empleada (Tabla 1).

## Modelación geoespacial

Estudio 1. Relación entre la productividad de la palma de aceite y la fertilidad del suelo de acuerdo con la topografía (Balasundram *et al.*, 2006a)

Se efectuó un estudio con el objeto de evaluar la forma como la topografía afecta la fertilidad del suelo y la productividad de la palma de aceite en una plantación comercial localizada en el sur de Sumatra, Indonesia. Se dividieron dos sitios con historia de manejo y esquemas de fertilidad diferentes en tres posiciones topográficas. En cada posición topográfica se registraron los rendimientos a intervalos de diez días durante un período de dos años. Se recogieron muestras de hojas y suelos de puntos correspondientes a intervalos de 36,4 m (dirección X) y 8,7 m (dirección Y) utilizando un esquema sistemático. El análisis foliar se realizó con el fin de cuantificar N, P, K, Mg y Ca, mientras que el objeto del análisis del suelo fue determinar pH, C orgánico, P extraíble, K intercambiable, Mg y Ca, CEIC (Capacidad Efectiva de Inter-

**Tabla 1.** Plataformas empleadas, presentadas de acuerdo con el alcance de la investigación. Estudios publicados sobre AP en palma de aceite (2006-2015).

Plataforma tecnológica	Alcance de la investigación	Palabras clave
Modelación geoespacial	Rendimientos en Racimo de Fruta Fresca Nutrientes foliares y de suelos Ensayos de fertilizantes Carbono orgánico del suelo	Variabilidad espacial, zonas de manejo, análisis del vecino más cercano, zonas operativas
Sistema de apoyo a las decisiones	Rendimiento del aceite Calidad del aceite	Cosecha de Racimo de Fruta Fresca, procesamiento de imágenes, color superficial, índice de grado de blanqueabilidad
Detección remota y proximal	Productividad en Racimo de Fruta Fresca Detección de enfermedades Calidad del aceite Densidad de siembra	Índices de vegetación, reflectancia espectral, sensor, sistema de información geográfica, Google Earth

cambio Catiónico), y textura. Los datos recabados se sometieron a análisis exploratorios, univariados y bivariados, y también a un análisis de varianza. Se definieron funciones empíricas de producción para cada posición topográfica con base en variables medidas. Los resultados mostraron que la productividad promedio en los dos sitios del estudio varió, dependiendo de la posición topográfica. En el sitio 1 (Plantación Sungai Pelepah), la productividad fue constantemente mayor en la ladera y en la cima que en el talud (Tabla 2). En el sitio 2 (Plantación Sri Gunung) se observó un gradiente de producti-

vidad, siendo esta más alta en el talud y más baja en la cima (Tabla 3). La fertilidad del suelo varió en las distintas posiciones topográficas en los dos sitios. Las variables medidas en las hojas y el suelo demostraron niveles diferentes de optimalidad/suficiencia en las distintas posiciones topográficas. En la mayoría de los casos, las variables foliares y del suelo demostraron un desempeño comparable como predictores de productividad (Tabla 4). La validación de los modelos calibrados mostró exactitud razonable para el talud en el sitio 1 y en las tres posiciones en el sitio 2.

**Tabla 2.** Comparación de variables (hojas y suelo) y la productividad correspondiente en las distintas posiciones topográficas en la Plantación Sungai Pelepah.

Variables <sup>1</sup>	Talud	Ladera	Cima
<b>Hojas</b>			
N	2,71 <sup>b</sup>	2,76 <sup>a</sup>	2,72 <sup>b</sup>
P	0,16 <sup>b</sup>	0,16 <sup>b</sup>	0,17 <sup>a</sup>
K	0,99 <sup>ab</sup>	0,97 <sup>bc</sup>	1,00 <sup>a</sup>
Mg	0,42 <sup>b</sup>	0,41 <sup>b</sup>	0,45 <sup>a</sup>
Ca	0,74 <sup>a</sup>	0,64 <sup>c</sup>	0,71 <sup>ab</sup>
<b>Suelo</b>			
pH			
0-20 cm	4,46 <sup>a</sup>	4,26 <sup>bc</sup>	4,14 <sup>c</sup>
OM			
0-20 cm	2,06 <sup>ab</sup>	2,32 <sup>a</sup>	1,96 <sup>b</sup>
P			
0-20 cm	<sup>x</sup> 12,24 <sup>b</sup>	<sup>x</sup> 157,14 <sup>a</sup>	<sup>x</sup> 18,36 <sup>b</sup>
20-40 cm	<sup>y</sup> 3,23 <sup>b</sup>	<sup>y</sup> 6,31 <sup>a</sup>	<sup>y</sup> 2,90 <sup>b</sup>

**Continuación Tabla 2.** Comparación de variables (hojas y suelo) y la productividad correspondiente en las distintas posiciones topográficas en la Plantación Sungai Pelepah.

Variables <sup>1</sup>	Talud	Ladera	Cima
K			
0-20 cm	<sup>x</sup> 0,30 <sup>a</sup>	<sup>x</sup> 0,20 <sup>a</sup>	<sup>x</sup> 0,15 <sup>a</sup>
20-40 cm	<sup>y</sup> 0,12 <sup>a</sup>	<sup>y</sup> 0,08 <sup>b</sup>	<sup>y</sup> 0,06 <sup>b</sup>
Mg			
0-20 cm	<sup>x</sup> 0,71 <sup>a</sup>	<sup>x</sup> 0,31 <sup>b</sup>	<sup>x</sup> 0,43 <sup>b</sup>
20-40 cm	<sup>y</sup> 0,15 <sup>a</sup>	<sup>y</sup> 0,10 <sup>c</sup>	<sup>y</sup> 0,11 <sup>bc</sup>
Ca			
0-20 cm	<sup>x</sup> 1,11 <sup>b</sup>	<sup>x</sup> 1,54 <sup>a</sup>	<sup>x</sup> 0,73 <sup>c</sup>
20-40 cm	<sup>y</sup> 0,30 <sup>ab</sup>	<sup>y</sup> 0,28 <sup>b</sup>	<sup>y</sup> 0,24 <sup>c</sup>
CIEC			
0-20 cm	6,33 <sup>a</sup>	4,46 <sup>b</sup>	3,71 <sup>c</sup>
<sup>2</sup> Textura	LC	SCL, LC	LC
<sup>3</sup> Productividad	2,15 <sup>b</sup>	3,79 <sup>a</sup>	3,97 <sup>a</sup>

- 1 Expresadas en las unidades siguientes: % (para nutrientes foliares y materia orgánica en el suelo), mg kg-1 (para P del suelo) y m.e. 100 g-1 (para K, Mg, Ca y CIEC del suelo)
- 2 Interpretada con base en el esquema de la Sociedad Internacional de Ciencias del Suelo (ISSS) [Donde: LC = arcilla liviana, SCL = marga de arcilla y arena]
- 3 Reportada en términos del promedio de dos años de RFF (kg) por palma

**Nota:** no hay diferencia significativa en ninguno de los dos sitios experimentales para los valores promedio seguidos del mismo superíndice en el mismo renglón y del mismo subíndice en cada columna (solo para P, K, Mg, Ca del suelo),  $p = 0,05$ .

**Tabla 3.** Comparación de las variables (hojas y suelo) y la productividad correspondiente para las distintas topografías en la Plantación Sri Gunung.

Variables <sup>1</sup>	Talud	Ladera	Cima
<b>Hojas</b>			
N	2,75 <sup>a</sup>	2,75 <sup>a</sup>	2,73 <sup>a</sup>
P	0,18 <sup>a</sup>	0,15 <sup>c</sup>	0,16 <sup>b</sup>
K	0,98 <sup>a</sup>	0,93 <sup>b</sup>	0,96 <sup>a</sup>
Mg	0,40 <sup>b</sup>	0,43 <sup>a</sup>	0,42 <sup>ab</sup>
Ca	0,78 <sup>a</sup>	0,72 <sup>b</sup>	0,71 <sup>b</sup>
<b>Suelo</b>			
pH			
0-20 cm	4,78 <sup>a</sup>	4,27 <sup>b</sup>	4,16 <sup>c</sup>
OM			
0-20 cm	2,59 <sup>a</sup>	2,22 <sup>b</sup>	2,33 <sup>ab</sup>
P			
0-20 cm	<sup>x</sup> 79,38 <sup>a</sup>	<sup>x</sup> 77,98 <sup>a</sup>	<sup>x</sup> 7,14 <sup>b</sup>
20-40 cm	<sup>y</sup> 9,84 <sup>a</sup>	<sup>y</sup> 2,41 <sup>b</sup>	<sup>y</sup> 1,43 <sup>c</sup>
K			
0-20 cm	<sup>x</sup> 0,23 <sup>a</sup>	<sup>x</sup> 0,20 <sup>a</sup>	<sup>x</sup> 0,20 <sup>a</sup>
20-40 cm	<sup>y</sup> 0,25 <sup>a</sup>	<sup>y</sup> 0,10 <sup>b</sup>	<sup>y</sup> 0,10 <sup>b</sup>
Mg			
0-20 cm	<sup>x</sup> 0,65 <sup>a</sup>	<sup>x</sup> 0,70 <sup>a</sup>	<sup>x</sup> 0,61 <sup>a</sup>
20-40 cm	<sup>y</sup> 0,19 <sup>a</sup>	<sup>y</sup> 0,20 <sup>a</sup>	<sup>y</sup> 0,19 <sup>a</sup>

**Continuación Tabla 3.** Comparación de las variables (hojas y suelo) y la productividad correspondiente para las distintas topografías en la Plantación Sri Gunung.

Variables <sup>1</sup>	Talud	Ladera	Cima
Ca			
0-20 cm	<sup>x</sup> 1,63 <sup>a</sup>	<sup>x</sup> 1,49 <sup>a</sup>	<sup>x</sup> 1,19 <sup>b</sup>
20-40 cm	<sup>y</sup> 0,47 <sup>a</sup>	<sup>y</sup> 0,31 <sup>c</sup>	<sup>y</sup> 0,38 <sup>b</sup>
CIEC			
0-20 cm	5,46 <sup>a</sup>	5,80 <sup>a</sup>	5,02 <sup>a</sup>
<sup>2</sup> Textura	SC	LC	LC
<sup>3</sup> Productividad	4,43 <sup>a</sup>	3,60 <sup>b</sup>	3,13 <sup>c</sup>

1 Expresadas en las unidades siguientes: % (para nutrientes foliares y materia orgánica en el suelo), mg kg<sup>-1</sup> (para P del suelo) y m.e. 100 g<sup>-1</sup> (para K, Mg, Ca y CIEC del suelo).

2 Interpretada con base en el esquema de la Sociedad Internacional de Ciencias del Suelo (ISSS) [Donde: LC = arcilla liviana, SCL = marga de arcilla arenosa]

3 Reportada en términos del promedio de tres meses de RFF (kg) por palma

**Nota:** no hay diferencia significativa en ninguno de los dos sitios experimentales para los valores promedio seguidos del mismo superíndice en el mismo renglón y del mismo subíndice en cada columna (solo para P, K, Mg, Ca del suelo), con  $p = 0,05$ .

**Tabla 4.** Relación entre productividad y variables de hojas/suelo en las distintas topografías en los dos sitios del estudio.

Posición topográfica	Modelo de regresión <sup>§</sup>	R <sup>2</sup>	Ajustado R <sup>2</sup>
<b>Plantación Sungai Pelepah</b>			
Talud	(1) Productividad = $-6,07 + 51,40 * P$ foliar (2) Productividad = $11,44 - 0,55 * (N:P)$ foliar (3) Productividad = $0,36 + 0,62 * OM + 0,20 * P$ del subsuelo (4) Productividad = $4,13 - 2,98 * (Mg:Ca)$ del suelo	0,63 0,84 0,90	0,54 0,80 0,83
Ladera	(2) Productividad = $1,50 + 11,80 * (P:K)$ foliar	0,68	0,60
Cima	-Sin modelo significativo-	0,67	0,59
		-	-
<b>Plantación Sri Gunung</b>			
Talud	(1) Productividad = $5,22 - 2,53 * Mg$ foliar (2a) Productividad = $3,19 + 0,15 * (N:Mg)$ foliar (2b) Productividad = $3,04 + 2,66 * (P:Mg)$ foliar (3) Productividad = $3,66 + 0,10 * pH$	0,76 0,80 0,79 0,66	0,70 0,75 0,74 0,58
Ladera	(3) Productividad = $8,78 - 0,70 * CIEC - 19,03 * \log$ (Mg del subsuelo)	0,89	0,82
Cima	(1) Productividad = $28,25 - 9,28 * N$ foliar (4) Productividad = $3,88 - 2,57 * (K:Mg)$ del suelo	0,89 0,75	0,86 0,68

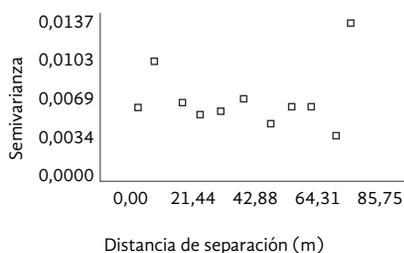
§ Desarrollado separadamente utilizando el grupo siguiente como predictor de productividad: variables foliares, (2) índices de nutrientes foliares, (3) variables del suelo, (4) índices de nutrientes de la capa vegetal.

## Estudio 2. Variabilidad espacial de las variables de fertilidad del suelo que influyen sobre la productividad de la palma de aceite (Balasundram y cols., 2006b)

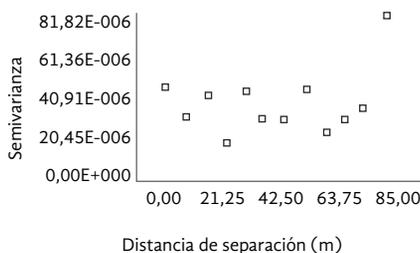
Este estudio (extensión del Estudio 1) ofrece información sobre la variabilidad espacial de las variables de fertilidad del suelo que influyen en la productividad

de la palma de aceite en lotes de pequeña escala situados en distintas posiciones topográficas. Para cada posición topográfica se determinaron las variables que influyen en la productividad (VIP) y luego se sometieron a análisis de datos espaciales con variografía e interpolación (ponderación inversa de la distancia). Los resultados demostraron que la estructura espacial de las VIP fue diferente en las distintas posiciones topográficas (Figuras 1, 2 y 3).

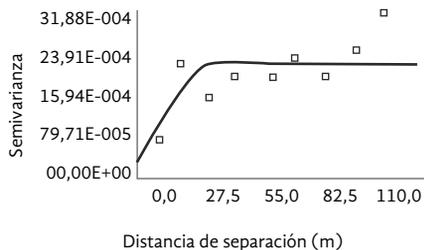
(i) **N foliar (%)**  
Estructura espacial: Aleatoria



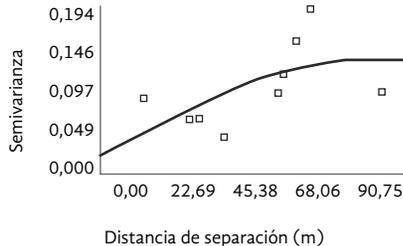
(ii) **P foliar (%)**  
Estructura espacial: Aleatoria



(iii) **Mg foliar (%)**  
Modelo: Esférico; Dependencia Espacial: Fuerte  
Pepita =  $3 \times 10^{-4}$ ; Meseta =  $22 \times 10^{-3}$ ; Rango Efect = 32 m

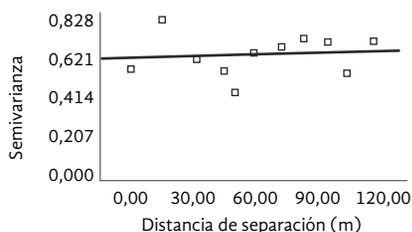


(iv) **pH del suelo**  
Modelo: Esférico; Dependencia Espacial: Fuerte  
Pepita =  $1,89 \times 10^{-2}$ ; Meseta = 0,133; Rango efect = 81 m

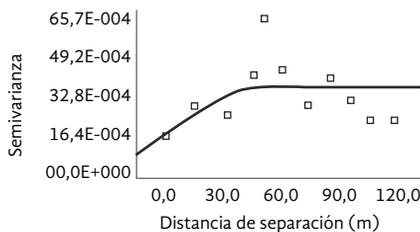


**Figura 1.** Semivariogramas de las VIP en el talud.

(i) **CIEC (m.e. 100 g<sup>-1</sup>)**  
Estructura espacial: Aleatoria

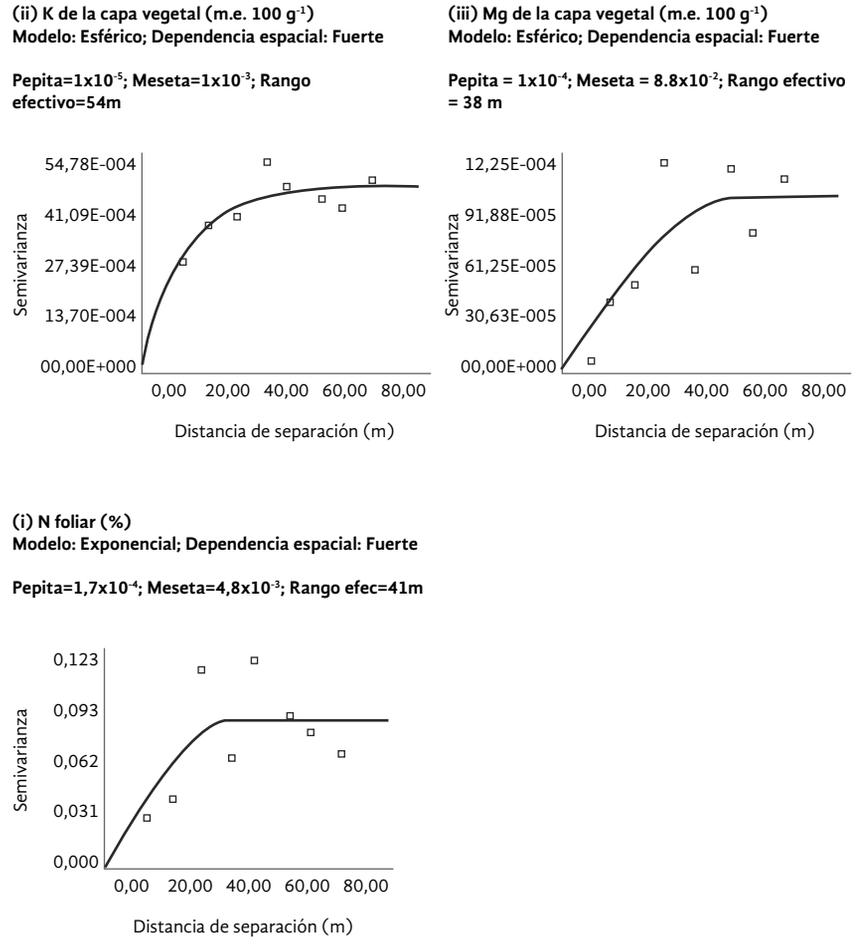


(iv) **Mg del subsuelo (m.e. 100 g<sup>-1</sup>)**  
Modelo: Esférico; Dependencia espacial: Moderada  
Pepita =  $9,9 \times 10^{-4}$ ; Meseta =  $3,7 \times 10^{-3}$ ; Rango efec = 58m



**Figura 2.** Semivariogramas de las VIP en la ladera.

**Figura 3.** Semivariogramas de las VIP en la cima.



Se determinó que la estrategia óptima de muestreo depende del tipo de variable investigada y su posición topográfica. Se pueden obtener estimativos precisos (intervalo de confianza de 95 %, error relativo de 10 %) de los valores de las pruebas foliares a partir de un tamaño de muestra consistente en 5 puntos. El tamaño de muestra requerido varió de acuerdo con la variable foliar en el siguiente orden:

N/P < Mg  
→  
Mayor tamaño de muestra (n)

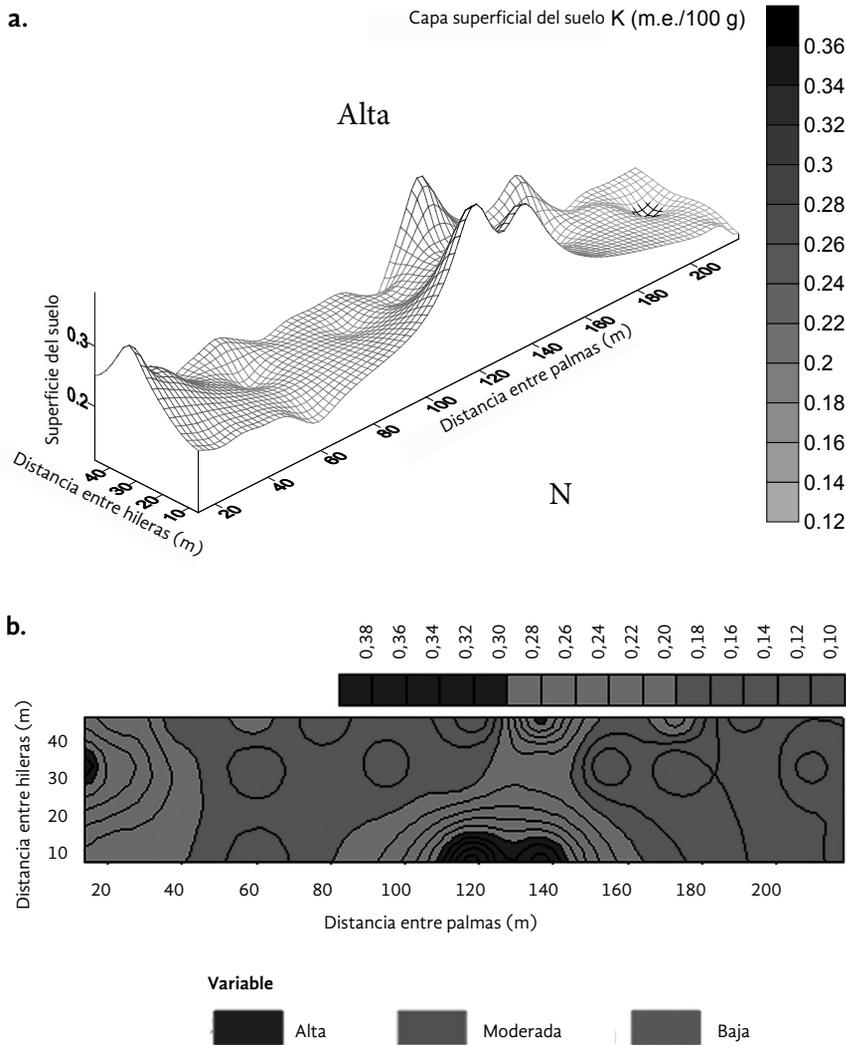
En las variables del suelo, para lograr estimativos razonablemente precisos (intervalo de confianza de 95 %, error relativo de 10 %), se requiere un tamaño de muestra que abarque 86 puntos. El tamaño de muestra requerido varió de acuerdo con la variable del suelo en el siguiente orden:

pH < CIEC < Mg del subsuelo < K de la  
capa vegetal < Mg de la capa vegetal  
→  
Mayor tamaño de muestra (n)

Al parecer, es apropiado para el manejo de la fertilización un concepto de manejo de la zona en el que se utilice la topografía como factor de delineación. Solamente el potasio (K) demostró demarcar con claridad las zonas con valores altos, moderados o bajos y, por tanto, la necesidad de un manejo de tasa variable (Figura 4).

Estudio 3. Consideración de la variabilidad espacial en ensayos de fertilidad de la palma de aceite (Balasundram y cols., 2006c)

Las variaciones espaciales de la fertilidad del suelo pueden ocultar los efectos del tratamiento y, por ende,



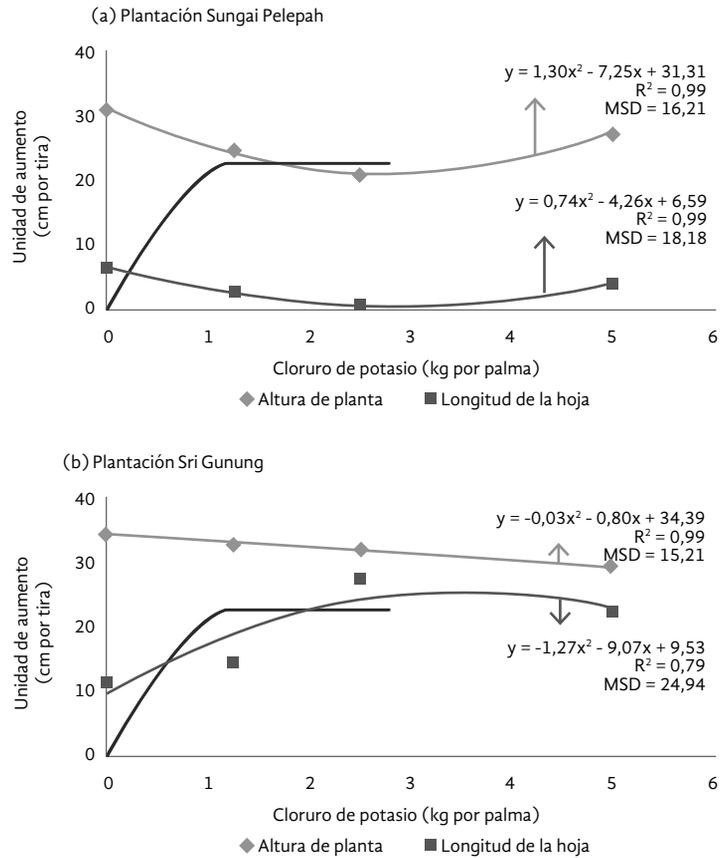
**Figura 4.** (a) Variabilidad espacial del K de la capa vegetal en la cima y (b) mapa correspondiente de variabilidad reclasificada.

llevar a recomendaciones incorrectas sobre el uso de fertilizantes. Este estudio (una extensión del Estudio 2) tuvo por objeto evaluar el crecimiento de la palma de aceite en respuesta a la aplicación de K. La variable de respuesta en este estudio fue el crecimiento de la planta, expresado en altura de la palma y longitud de la hoja. Los efectos del tratamiento sobre la altura de la planta y la longitud de la hoja se investigaron mediante el análisis de variación (AOV). Las dos variables de crecimiento se evaluaron para estructura espacial por medio de variografía. Después se utilizó el análisis del vecino más cercano (NNA) para obtener datos ajustados de crecimiento. El NNA consistió de un proceso de tres pasos realizados de manera iterativa. Los efectos del tratamiento sobre los datos de crecimiento ajustados con el NNA se examinaron mediante el análisis AOV, y se compararon con los obtenidos utilizando las

mediciones originales de crecimiento. Los resultados mostraron que el efecto de los tratamientos sobre el crecimiento de la planta no fueron significativos antes de eliminar las tendencias espaciales (Figura 5). Las variables de crecimiento presentaron una tendencia espacial significativa (Figura 6). Para el crecimiento residual se encontró la observación correspondiente. Con la técnica NNA se redujo sustancialmente la variación estructural presente en los conjuntos de datos de crecimiento, lo cual permitió evaluar los efectos verdaderos del tratamiento (Figuras 7, 8). Después del ajuste NNA, las variables de crecimiento variaron significativamente entre los tratamientos, observándose el mayor aumento del crecimiento de la planta en el control no tratado (Figura 9). El ajuste NNA también se tradujo en una mayor precisión del modelo lineal, calculado mediante AOV.

**Figura 5.** Crecimiento en respuesta a los tratamientos en (a) la plantación Sungai Pelepah y (b) la plantación Sri Gunung

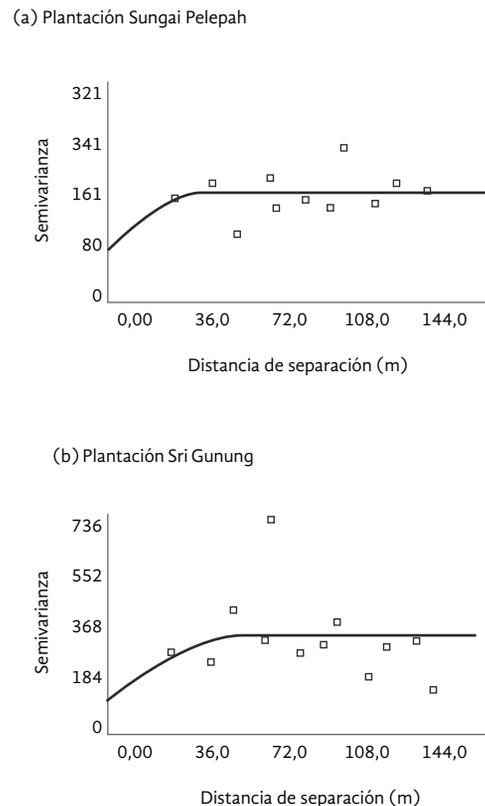
\*Nota: MSD = diferencia de significancia mínima basada en la prueba t del índice de K de Waller-Duncan; los promedios separados por valores inferiores o iguales a la MSD no presentan una diferencia significativa, con  $p = 0,05$ .



**Figura 6.** Atributos espaciales estructurales de (a) la longitud de las hojas en la plantación Sungai Pelepah y (b) la altura de las plantas en la plantación Sri Gunung

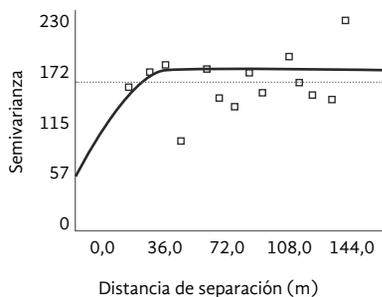
\*Nota: No se observó una tendencia espacial significativa en cuanto a la altura de las plantas en la plantación Sungai Pelepah o la longitud de las hojas en la plantación Sri Gunung.

**Longitud de la hoja (unidad de aumento, cm)**  
**Modelo: Esférico; Dependencia espacial: Moderada**  
**Pepita = 81,3; Meseta = 170,2;**  
**Rango efectivo = 38 m**



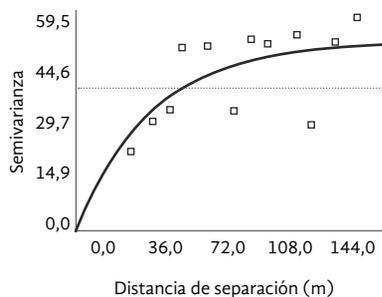
### Iteración 1

Modelo: Esférico; Dependencia espacial: Moderada  
Pepita = 55,8; Meseta = 174,7;  
Rango efectivo = 36 m



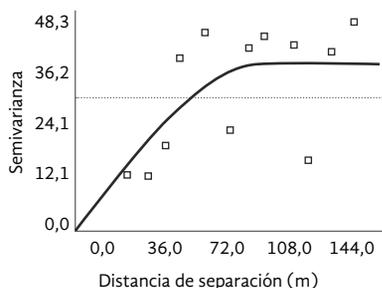
### Iteración 2

Modelo: Exponencial;  
Dependencia espacial: Fuerte  
Pepita = 0,1; Meseta = 52,7;  
Rango efectivo = 109 m



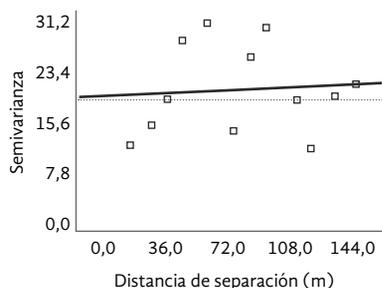
### Iteración 3 (final)

Modelo: Esférico; Dependencia espacial: Débil  
Pepita = 0,1; Meseta = 38,9;  
Rango efectivo = 95 m



### Después de la corrección<sup>§</sup>

Modelo: Lineal; Dependencia espacial: Débil  
Pepita = 19,9; Meseta = 21,7;  
Rango efectivo = 137 m



**Figura 7.** Semivariogramas de los residuos de la longitud de las hojas calculados de manera iterativa para la plantación Sungai Pelepah.

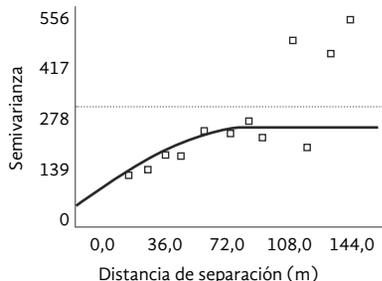
§ El factor de tendencia ( $3r^*$ ) se obtuvo mediante el siguiente modelo de regresión ( $R^2 = 0,8$ ):

$3r^* = 8,1 - 0,003(x) - 0,11(y)$ , donde ( $3r$ ) se refiere a los residuos de la longitud de las hojas en la iteración 3, ( $x$ ) es la distancia entre las palmas y ( $y$ ) es la distancia entre las hileras.

Los valores  $3r^*$  se restaron de los residuos finales reales ( $3r$ ) y después se evaluaron para estructura espacial

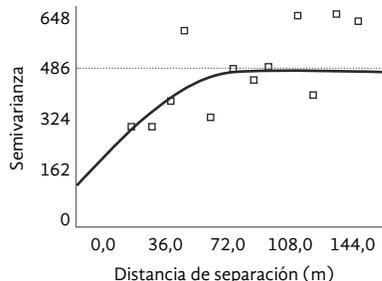
### Iteración 1

Modelo: Esférico; Dependencia espacial: Moderada  
Pepita = 130,3; Meseta = 475,9;  
Rango efectivo = 82 m



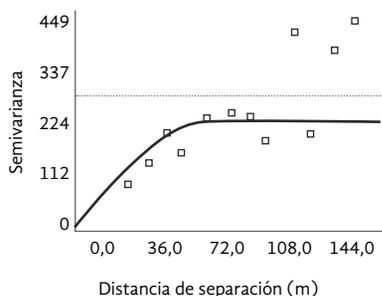
### Iteración 2

Modelo: Esférico; Dependencia espacial: Fuerte  
Pepita = 51,6; Meseta = 262,7;  
Rango efectivo = 85 m



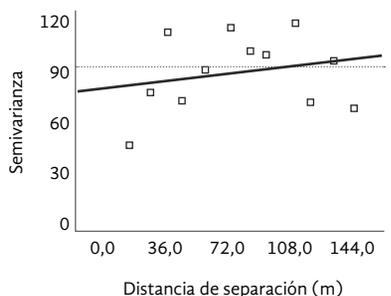
### Iteración 3 (final)

Modelo: Esférico; Dependencia espacial: Fuerte  
Pepita = 0; Meseta = 230,9; Rango efectivo = 65 m



### Después de la corrección<sup>§</sup>

Modelo: Lineal; Dependencia espacial: Débil  
Pepita = 81,2; Meseta = 98,4;  
Rango efectivo = 137 m



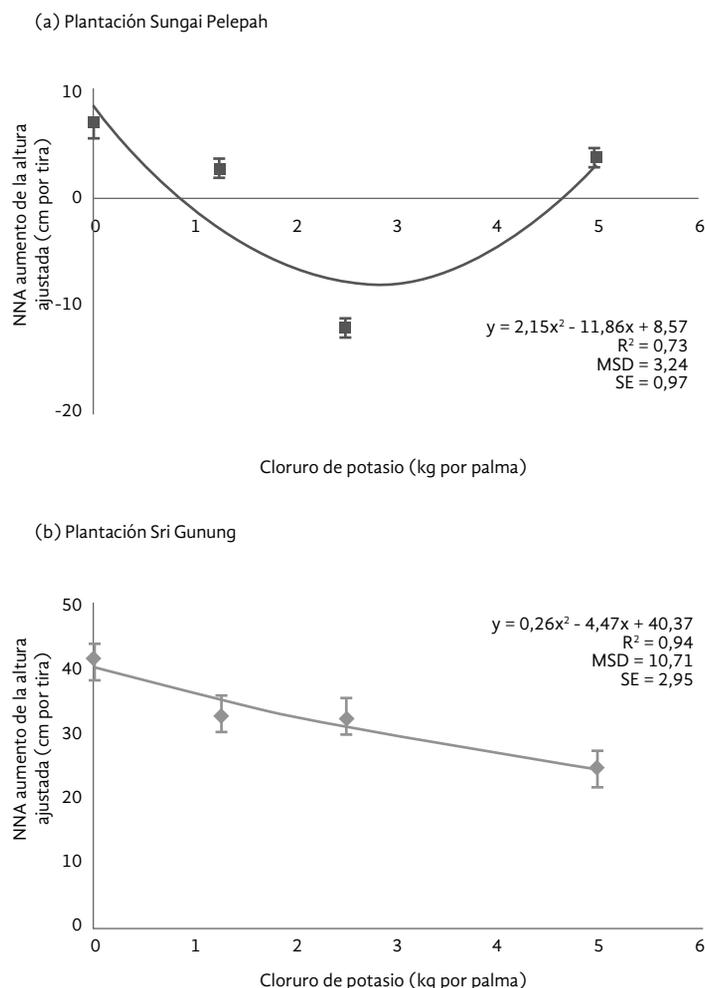
**Figura 8.** Semivariogramas de los residuos de la altura de las plantas calculados de forma iterativa para la plantación Sri Gunung

§ El factor de tendencia ( $3r^*$ ) se obtuvo mediante el siguiente modelo de regresión ( $R^2 = 0,6$ ):

$3r^* = -17,9 - 0,05(x) - 0,17(y) + 816,4(rIP)$ , donde  $3r$  se refiere a los residuos de la altura de las plantas en la iteración 3, ( $x$ ) es la distancia entre las palmas, ( $y$ ) es la distancia entre las hileras, y ( $rIP$ ) es el residuo de  $P$  de las hojas.

Los valores  $3r^*$  se restaron de los residuos finales reales ( $3r$ ) y después se evaluaron para estructura espacial.

**Figura 9.** Respuesta de crecimiento ajustada mediante NNA: (a) longitud de las hojas en la Plantación Sungai Pelepah, (b) altura de las plantas en la Plantación Sri Gunung \*Notas: MSD = diferencia mínima de significancia basada en la Prueba t del índice de K de Waller-Duncan; los promedios separados por valores inferiores o iguales a la MSD no presentan una diferencia significativa con  $p = 0,05$ , SE = error típico.



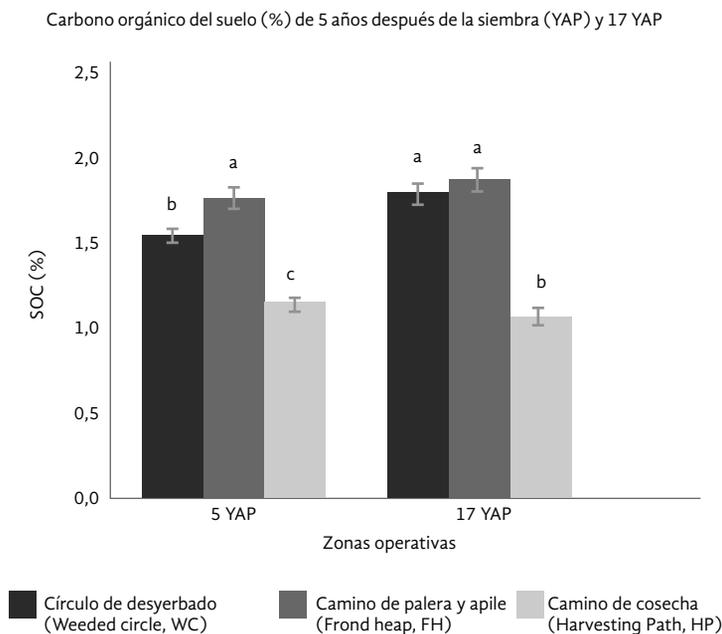
#### Estudio 4. Variabilidad espacial del carbón orgánico en el suelo y en los cultivos maduros de palma de aceite (Law y cols., 2009)

El objetivo de este estudio fue cuantificar la variabilidad espacial del carbón orgánico en el suelo (COS), calculando el COS en los sitios no muestreados y comparando la variabilidad espacial del COS entre los cultivos jóvenes y maduros de palma de aceite. El sitio del estudio se escogió para representar dos grupos de edades de la palma, a saber: 5 años y 17 años después de la siembra. Se utilizó un diseño de muestreo sistemático para tomar muestras del suelo a la profundidad de 0-20 cm con base en un conglomerado de cuatro palmas que comprendían tres zonas operativas: el plato (wc), la adición de materia orgánica (FH), y el sendero de cosecha (hp). Se

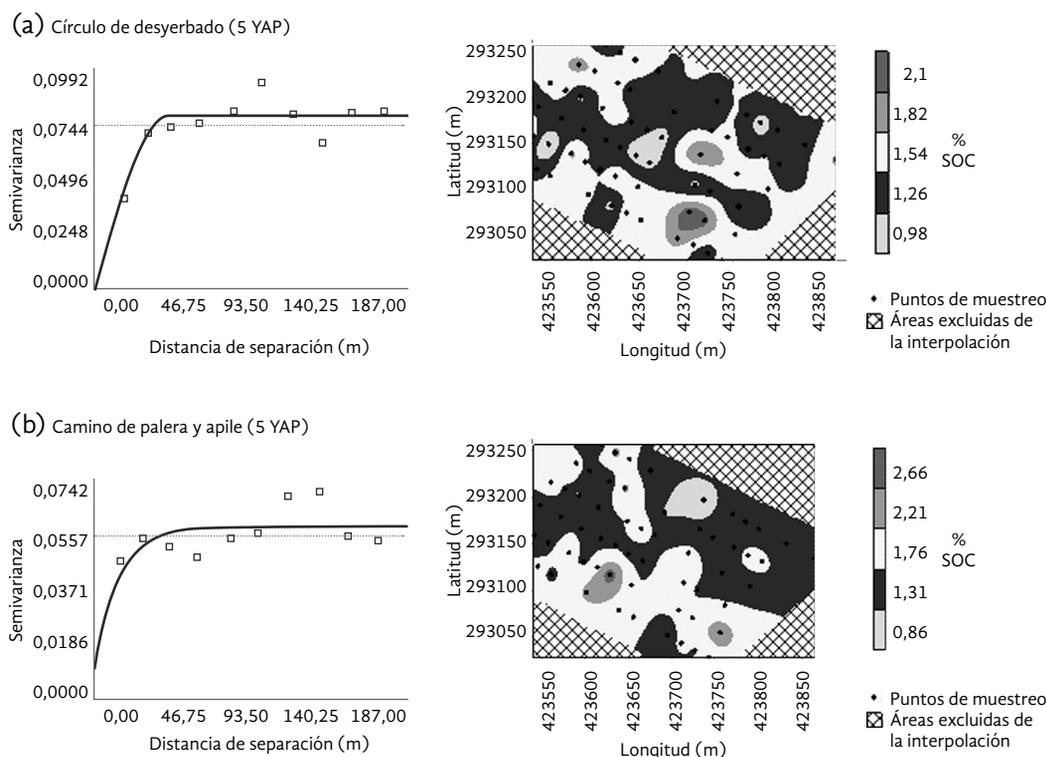
obtuvieron en total 60 conglomerados de muestreo para cada sitio. Se hizo la prueba de COS utilizando el método de combustión seca. Todos los puntos de medición se referenciaron mediante un Sistema de Posicionamiento Global diferencial (GPSd). Los datos del COS se exploraron primero por medio de estadística descriptiva, verificación de normalidad, detección de valores atípicos y transformación de datos, seguidos de variografía e interpolación. El mapa de la variabilidad espacial del COS se realizó con base en valores medidos y sometidos a *Kriging*. Los resultados mostraron heterogeneidad del COS entre las distintas zonas operativas, en donde los valores más altos de COS se registraron en la adición de materia orgánica, seguidos del plato y el sendero de cosecha en los dos sitios (Figura 10). Todas las zonas operativas presentaron una estructura espacial definible, la cual se describió mediante modelos esféricos o exponenciales. Todas las zonas operativas

mostraron una dependencia espacial fuerte (Figuras 11, 12). Las zonas operativas de las palmas de cinco años de edad mostraron un rango efectivo menor que el de las palmas de 17 años. La concentración de COS en las palmas de 17 años fue más estable que

la encontrada en las palmas de cinco años. Los hallazgos de este estudio sugieren que la evaluación de la variabilidad espacial es una técnica factible para cuantificar la variabilidad del COS en el cultivo de palma de aceite.



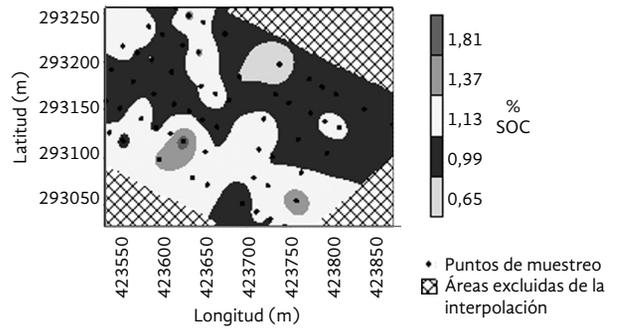
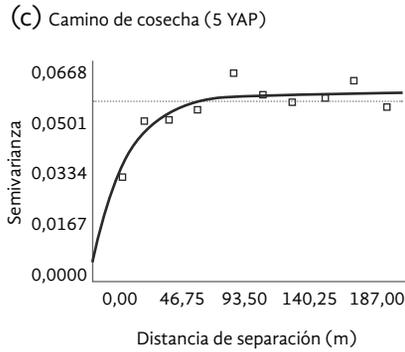
**Figura 10.** Contenido de carbón orgánico en el suelo (SOC) (%) a una profundidad de 0-20 cm en las tres zonas operativas (WC, FH y HP) y a 5 y 17 años después de la siembra (YAP).



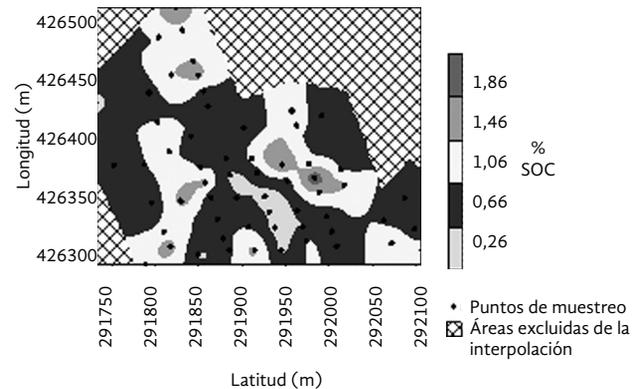
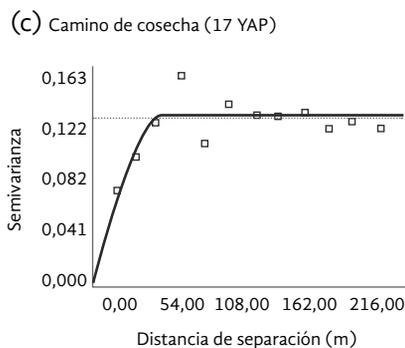
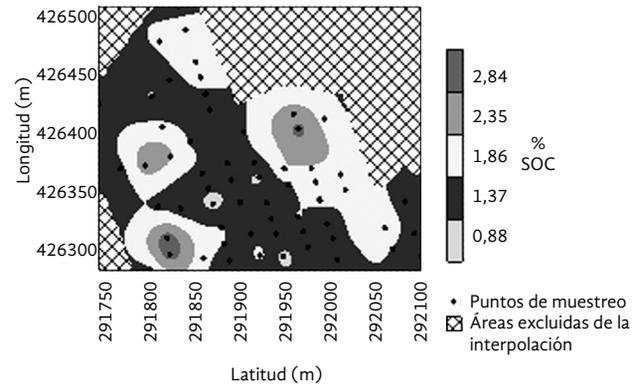
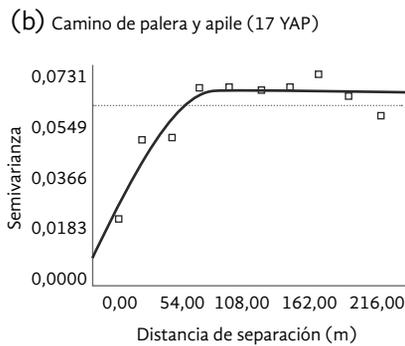
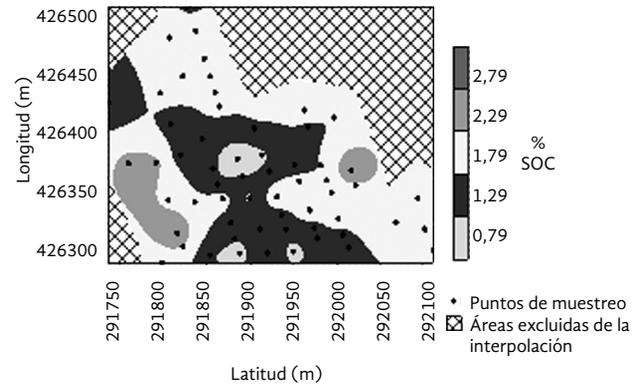
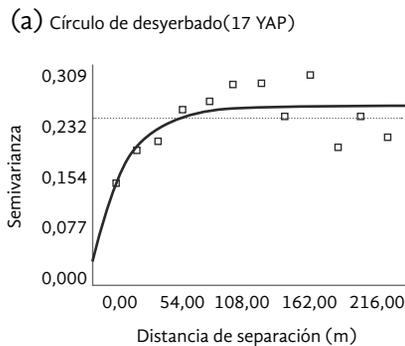
**Figura 11.** Semivariograma y mapa de variabilidad correspondiente de COS para (a) WC, (b) FH y (c) HP a cinco años después de la siembra.

**Continuación**

**Figura 11.**  
Semivariograma  
y mapa de  
variabilidad  
correspondiente  
de COS para (a)  
WC, (b) FH y (c)  
HP a cinco años  
después de la  
siembra.



**Figura 12.**  
Semivariograma  
y mapa  
correspondiente  
de variabilidad del  
COS en (a) WC,  
(b) FH y (c) HP a  
17 años después  
de la siembra.



## Sistema de apoyo a las decisiones

### Estudio 5. Relación entre el contenido de aceite y el color superficial de la fruta de la palma de aceite (Balasundram y cols., 2006d)

El objetivo de este estudio fue investigar la relación entre el contenido de aceite y la distribución del color superficial de la fruta. Se tomaron al azar 80 muestras de fruta en campo; cada muestra incluyó dos frutas. Se tomaron fotografías digitales de las muestras a temperatura ambiente y en condiciones controladas de iluminación; posteriormente, las muestras se sometieron al análisis del aceite total por medio de técnicas de extracción de Soxhlet. Las imágenes digitales se rectificaron primero con el *software* Photoshop de Adobe, y luego se agruparon y sometieron a clasificación no supervisada mediante el aplicativo MultiSpec. La cuantificación de la distribución del color superficial se realizó en Arc View. La relación entre el

contenido de aceite y la distribución del color se determinó mediante una regresión lineal múltiple. Los resultados mostraron que el contenido total de aceite osciló entre 5,2 y 86,4 %. Se encontró una correlación significativa entre el aceite total y todos los componentes del color, siendo más fuerte la correlación con el negro ( $r = -0,85$ ), seguida de rojo ( $r = 0,81$ ), naranja ( $r = 0,62$ ) y amarillo ( $r = 0,48$ ). La mejor forma de explicar la relación entre el contenido total de aceite y los componentes del color fue por medio de los siguientes modelos de regresión: (1) % de aceite total =  $88,08 - 0,52 (\% \text{ negro}) + 1,30 \log (\% \text{ amarillo})$ , y (2) % de aceite total =  $36,84 + 0,63 (\% \text{ rojo}) + 1,52 \log (\% \text{ amarillo})$ . Estos dos modelos explicaron 80-81 % de la variación del color de la fruta (Tabla 5), con 87-88 % de bondad de ajuste (Figura 13). Al validar con otro conjunto de datos distinto, estos modelos demostraron una precisión de 73-75 % (Figura 14). El beneficio de cosechar la fruta del aceite de palma con base en la relación entre la distribución del color superficial y el aceite total se calculó en USD 0,15 por árbol por año (Tabla 6).

**Tabla 5.** Modelos de regresión lineal y sus atributos diagnósticos.

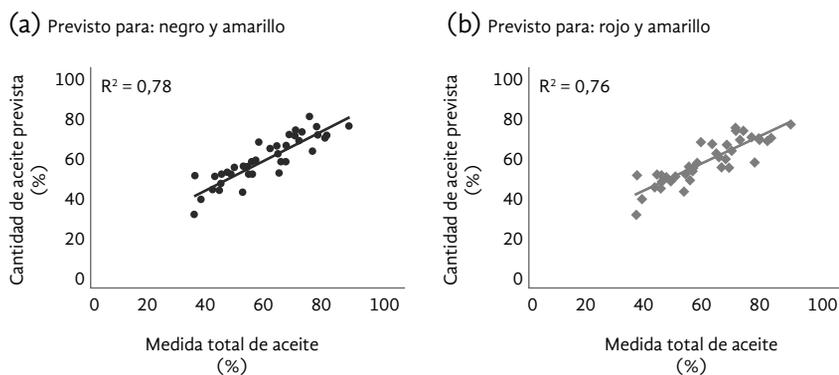
Modelo (descripción)	Ecuación <sup>Φ</sup>	R <sup>2</sup>	Sigma mayúscula	Valor de p para la regresión	Valor de p para falta de ajuste <sup>Ψ</sup>
1 (completo)	$TO = 62,80 - 0,42*B + 0,15*R - 0,17*O + 1,43*\log(Y) + 12,77*S$	0,83	5,96	**	-
2 (sub)	$TO = 87,43 - 0,57*B$	0,71	7,31	**	0,668
3 (sub)	$TO = 31,71 - 0,63*R$	0,66	7,98	**	0,137
4 (sub)	$TO = 46,17 - 1,51*O$	0,38	10,75	**	0,750
5 (sub)	$TO = 62,91 - 1,95*\log(Y)$	0,23	12,01	**	0,694
6 (sub)	$TO = 37,60 - 16,65*S$	0,03	13,49	ns	-
7 (sub)	$TO = 91,07 - 0,61*B - 0,19*O$	0,72	7,38	**	-
8 (sub)	$TO = 88,08 - 0,52*B + 1,30*\log(Y)$	0,81	6,02	**	0,718
9 (sub)	$TO = 31,63 - 0,57*R - 0,51*O$	0,69	7,74	**	-
10 (sub)	$TO = 36,84 + 0,63*R + 1,52*\log(Y)$	0,80	6,25	**	0,823

Φ Donde: TO = % aceite total, B = % Negro, R = % Rojo, O = % Naranja, Y = % Amarillo, y S = Forma

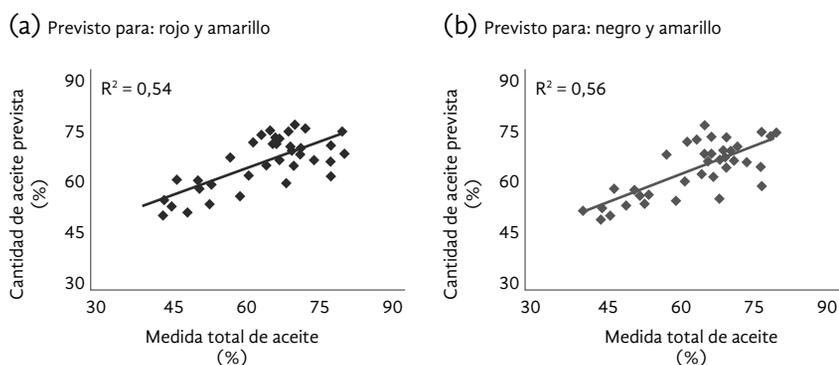
Ψ Calculado únicamente cuando todos los términos del modelo muestran significancia estadística

\*\* Significativo en  $p = 0,01$ , ns = no significativo

**Figura 13.** Relación entre el contenido total de aceite observado y pronosticado a partir de (a) submodelo 8 [% aceite total = 88,08 – 0,52 (% negro) + 1,30 log (% amarillo)] y (b) submodelo 10 [% aceite total = 36,84 + 0,63 (% rojo) + 1,52 log (% amarillo)]



**Figura 14.** Validación de (a) submodelo 8 [% aceite total = 88,08 – 0,52 (% negro) + 1,30 log (% amarillo)] y (b) submodelo 10 [% aceite total = 36,84 + 0,63 (% rojo) + 1,52 log (% amarillo)]



**Tabla 6.** Implicación económica de utilizar los modelos calibrados para calcular el contenido de aceite de palma.

	Seminario 1			Seminario 2		
<sup>1</sup> Modelo	TO = 88,08 - (0,52 * B) + (1,30 * log Y)			TO = 36,84 + (0,63 * R) + (1,52 * log Y)		
Entrada	B = 30, Y = 0,9 B = 48, Y = 0,9 B = 66, Y = 0,9			R = 29, Y = 0,9 R = 43, Y = 0,9 B = 58, Y = 0,9		
Cantidad de aceite prevista (%)	72,42	63,06	53,70	55,04	63,86	73,31
<sup>2</sup> Valor (USD):						
Por planta y por año	13,62	11,86	10,10	10,35	12,01	13,78
Por hectárea y por año	1851,65	1612,33	1373,01	1407,27	1632,78	1874,40
Beneficio (Valor por planta por año) matriz de comparación:						
Modelos de entrada	B <sub>30</sub> Y <sub>0,9</sub>	B <sub>48</sub> Y <sub>0,9</sub>	B <sub>66</sub> Y <sub>0,9</sub>			
R <sub>29</sub> Y <sub>0,9</sub>	-3,27					
R <sub>43</sub> Y <sub>0,9</sub>		0,15				
R <sub>58</sub> Y <sub>0,9</sub>			3,69			

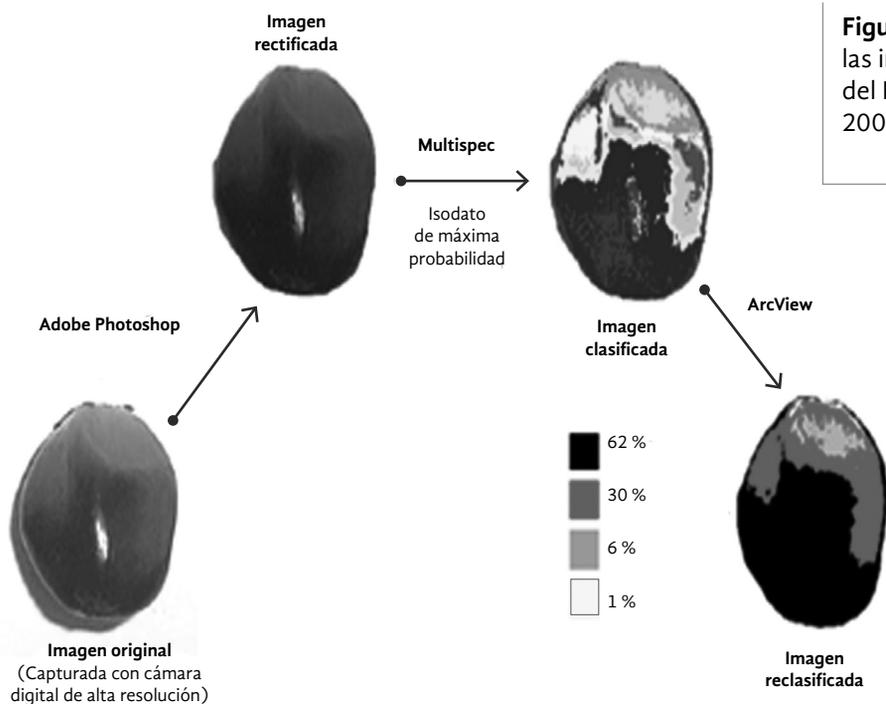
<sup>1</sup>Donde: TO = % aceite total, B = % Negro, R = % Rojo, Y = % amarillo.

<sup>2</sup>Extrapolado para representar un RFF con base en un promedio de muestra de dos frutas.

Estudio 6. Desarrollo de una técnica no destructiva para calcular la calidad de la fruta de la palma de aceite. (Balasundram y cols., 2008 – documento protegido por derecho de autor)

Este estudio tuvo por objeto computarizar los protocolos de análisis de las imágenes y cálculo del rendimiento/calidad del aceite de palma, desarrollados a partir del Estudio 5 (Figura 15). La variable adicional incluida en este trabajo fue el Índice del Grado de Blanqueabilidad (DOBI), el cual se utiliza en la industria como medida estándar de la calidad del aceite de palma. El valor de corte para el DOBI oscila entre

3,5 y 4,0. Las frutas con un DOBI superior al valor de corte se consideran de alta calidad, y las que tienen un DOBI inferior al valor de corte se consideran de baja calidad. Los resultados mostraron una relación positiva entre el DOBI y el % de rojo en las palmas maduras y jóvenes. La relación fue más pronunciada en el límite superior ( $DOBI > 4,0$ ), especialmente en palmas maduras (Tabla 7). La computarización de los protocolos de análisis de las imágenes y cálculo de la calidad del aceite se hizo a través de una interfaz consistente en Visual Basic 6.0 e Ilwis 3.2. Se ha desarrollado un enfoque no destructivo para calcular la calidad del aceite de palma (y el rendimiento) con base en imágenes digitales y programación por computador (Figura 16).

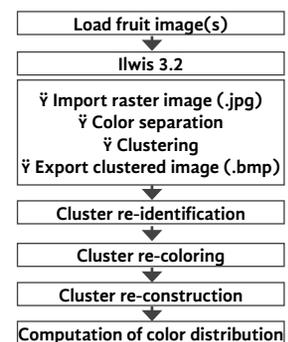
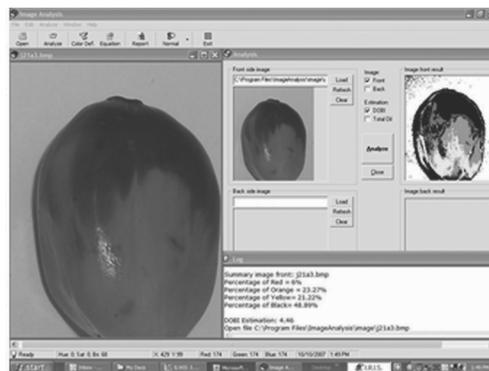


**Figura 15.** Protocolo de análisis de las imágenes desarrollado a partir del Estudio 5. (Balasundram y cols., 2006d).

**Tabla 7.** Regresión del DOBI para el color superficial de la fruta.

Edad de la palma	DOBI	Modelo
< 5 (joven)	< 4	$DOBI = 4,1 - 0,03*\%O$
	> 4	$DOBI = 6,6 + 1,52*\log \%R$
> 5 (madura)	< 4	$DOBI = 3,6 + 0,02*\%R$
	> 4	$DOBI = 4,4 + 2,49*\log \%R - 2,08*\log RY$

**Figura 16.** Técnica computarizada para calcular la calidad de la fruta de la palma de aceite.



## Detección remota y proximal

Estudio 8. Cálculo de la productividad de la palma de aceite mediante índices de vegetación tomados de QuickBird. (Balasundram y cols., 2013)

Se utilizaron imágenes satelitales tomadas en una sola fecha y archivadas en QuickBird junto con datos de productividad de la palma de aceite recogidos durante una serie temporal de 12 años a fin de generar modelos empíricos de productividad de la palma de aceite en las condiciones de Malasia. Los índices de vegetación y los datos de productividad se sometieron a un análisis de correlación seguido de modelos de regresión y validación de los modelos mediante métricas estándar. Los resultados revelaron una correlación positiva fuerte entre los índices de vegetación y la productividad de la palma de aceite, comparando

distintos períodos de siembra. Entre los índices de vegetación el RVI (Índice de vegetación de relación) mostró la mejor correlación con la productividad de la palma de aceite (Tabla 8). Se demostró que los modelos empíricos fueron acertados para los períodos de siembra comprendidos entre 1990-2002 y 1998-1999 (Tabla 9). Los modelos construidos utilizando el RVI y el MSAVI (Índice de vegetación modificado ajustado para el suelo) mostraron una concordancia fuerte entre la productividad estimada y la observada (Figura 17). Sin embargo, en el período de siembra de 1998-1999 solamente mostraron fuerza confiable para estimar la productividad el RVI y el GNDVI (Índice de vegetación de diferencia normalizada para el verde) (Figura 18). En términos generales, los hallazgos de este estudio sugieren que los índices de vegetación seleccionados de QuickBird sirven para estimar la productividad de la palma de aceite con una precisión confiable.

**Tabla 8.** Correlación entre la productividad de la palma de aceite y los índices de vegetación comparando distintos períodos de siembra.

Año de siembra	n	RVI	NDVI	MSAVI	GNDVI
1990-2002	56	0,789**	0,762**	0,744**	0,713**
1990-1997	17	0,380	0,522*	0,398	0,311
1998-1999	12	0,895**	0,831**	0,761**	0,884**
2000-2002	27	0,617**	0,599**	0,611**	0,559**

\* Significativo en  $p < 0,05$ . \*\* Significativo en  $p < 0,01$ .

RVI: índice de vegetación de relación; NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada; MSAVI: Índice de vegetación modificado ajustado para el suelo; ; GNDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada para el verde.

Nota: La nube de datos para cada correlación aparece al lado del valor respectivo de correlación.

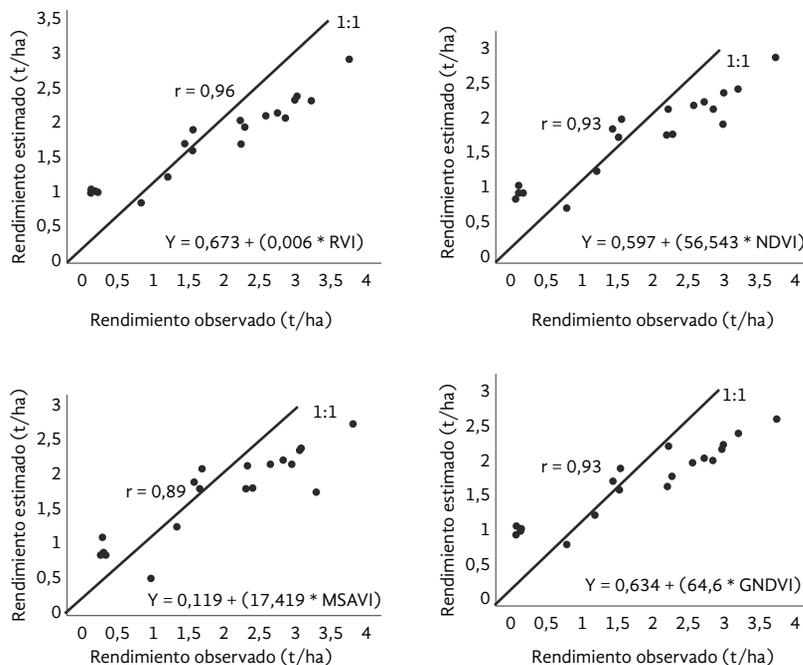
**Tabla 9.** Regresión de la productividad de la palma de aceite (Y) sobre índices de vegetación basados en los datos de calibración.

Período de siembra	n	Índice de vegetación	R <sup>2</sup>	GOF	F	p	Ecuación de regresión
1990-2002 (Serie temporal completa)	37	RVI	0,491	<0,8	33,799	0,000	$Y = 0,673 + (0,006 \times RVI)^*$
		NDVI	0,445	<0,8	28,013	0,000	$Y = 0,597 + (56,543 \times NDVI)^*$
		MSAVI	0,430	<0,8	26,419	0,000	$Y = 0,119 + (17,419 \times MSAVI)^*$
		GNDVI	0,339	<0,8	17,970	0,000	$Y = 0,634 + (64,6 \times GNDVI)^*$
1990-1997 (palmas de 8 a 15 años de edad)	11	RVI	0,086	<0,8	0,845	0,382	$Y = 1,502 + (0,004 \times RVI)$
		NDVI	0,209	<0,8	2,377	0,158	$Y = 1,327 + (45,037 \times NDVI)$
		MSAVI	0,090	<0,8	0,894	0,369	$Y = 0,72 + (15,268 \times MSAVI)$
		GNDVI	0,062	<0,8	0,595	0,460	$Y = 1,914 + (32,186 \times GNDVI)$
1998-1999 (palmas de 6 a 7 años de edad)	8	RVI	0,789	<0,8	22,376	0,003	$Y = 0,465 + (0,007 \times RVI)^*$
		NDVI	0,814	>0,8	26,321	0,002	$Y = 0,341 + (66,536 \times NDVI)^*$
		MSAVI	0,811	>0,8	25,795	0,002	$Y = -0,086 + (19,251 \times MSAVI)^*$
		GNDVI	0,761	<0,8	19,082	0,005	$Y = -0,076 + (100,106 \times GNDVI)^*$
2000-2002 (palmas de 3 a 5 años de edad)	18	RVI	0,091	<0,8	1,592	0,225	$Y = 1,234 + (0,002 \times RVI)$
		NDVI	0,058	<0,8	0,982	0,336	$Y = 1,292 + (14,139 \times NDVI)$
		MSAVI	0,066	<0,8	1,131	0,303	$Y = 1,166 + (4,482 \times MSAVI)$
		GNDVI	0,038	<0,8	0,633	0,438	$Y = 1,34 + (13,759 \times GNDVI)$

GOF: Bondad de ajuste.

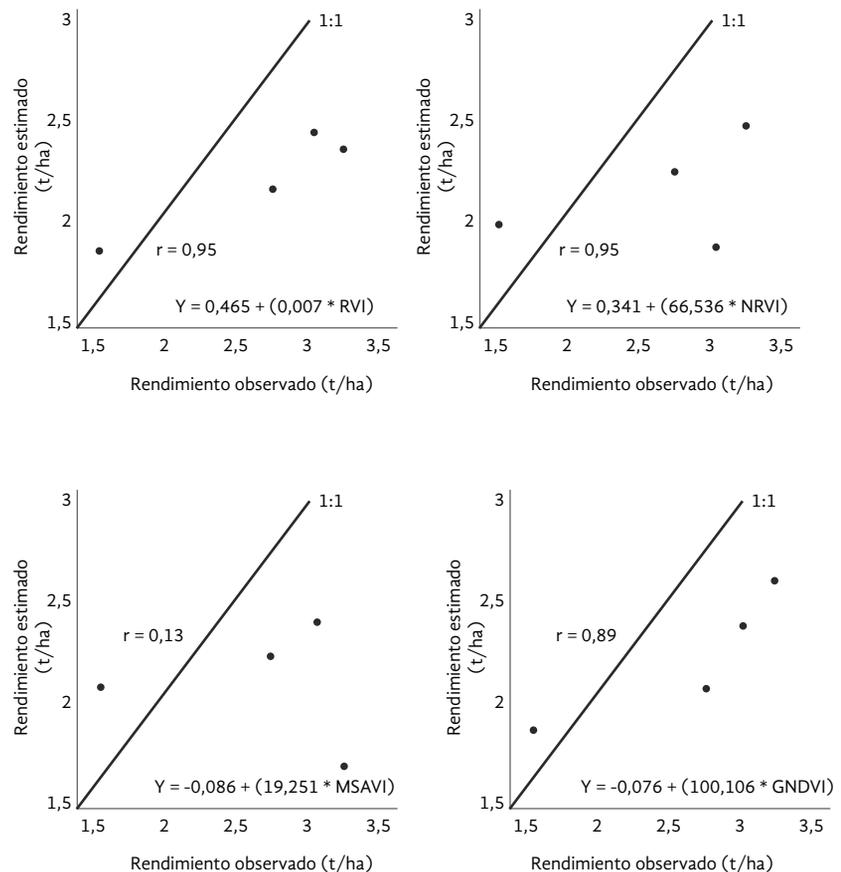
\* Significativo en un nivel de  $p < 0.05$  basado en la prueba F.

RVI: índice de vegetación de relación, NDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada, MSAVI: Índice de vegetación modificado ajustado para el suelo, GNDVI: Índice de vegetación de diferencia normalizada para el verde.



**Figura 17.** Ajuste entre la productividad observada y las productividades estimadas para palma de aceite en el período de siembra 1990-2002.

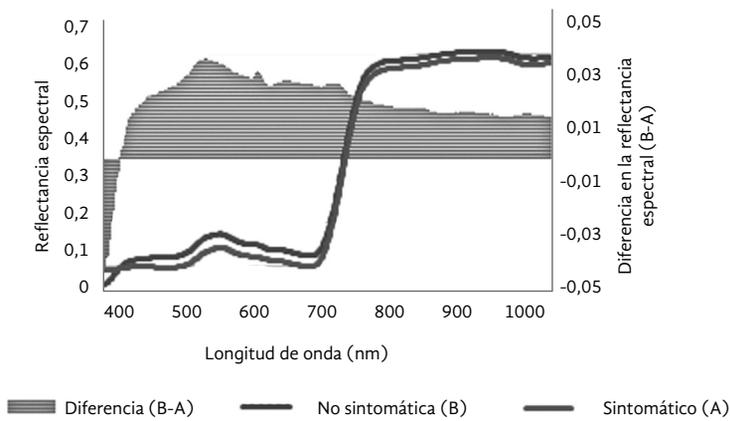
**Figura 18.** Ajuste entre la productividad observada y las productividades estimadas para la palma de aceite en el período de siembra 1998-1999.



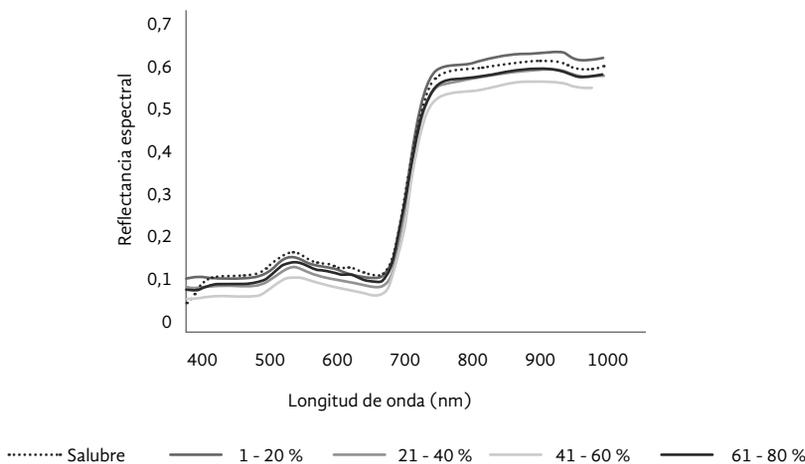
Estudio 9. La detección remota como herramienta para evaluar la enfermedad de la mancha naranja en la palma de aceite (Selvaraja *et al.*, 2014)

La enfermedad de la mancha naranja (*orange spotting*, OS) es un problema emergente en palma de aceite. Este trabajo explora el uso de la reflectancia espectral como herramienta para detectar la enfermedad de la mancha naranja, y clasificar y predecir la severidad de la misma con base en los índices de vegetación. Esta evaluación se realizó en una plantación comercial de palma de aceite en Malasia. Se hizo un muestreo sistemático de 40 palmas sintomáticas y 10 asintomáticas en un lote de observación de 4,2 hectáreas. El ensayo de Dot-Blot reveló la presencia de CCCVd en 40 % de las muestras obtenidas de las palmas asintomáticas. Las muestras de hojas sinto-

máticas mostraron una correlación significativa ( $r = -0,70$ ) entre la reflectancia de la clorofila de la hoja y la severidad de la enfermedad de la mancha naranja. La reflectancia espectral de las hojas sintomáticas fue significativamente menor que la de las hojas no sintomáticas en la región de longitud de onda de 465-711 nm (Figura 19). Sin embargo, la reflectancia de las hojas sanas y asintomáticas no presentó diferencias significativas en las distintas longitudes de onda investigadas. En las hojas sintomáticas, la reflectancia espectral mostró una tendencia a disminuir con un aumento hasta de 60 % en la severidad de la enfermedad, en las longitudes de onda de 555 nm y 780-1.000 nm (Figura 20). Entre los veinte índices de vegetación sometidos a prueba, el MCARI1 y el mSR<sub>705</sub> fueron los mejores para predecir la severidad de la enfermedad de la mancha naranja con una bondad de ajuste (medida vs. pronosticada) de 66 y 56 %, respectivamente.



**Figura 19.** Comparación de la reflectancia espectral entre el follaje asintomático (n = 10) y sintomático (n = 40).



**Figura 20.** Reflectancia espectral de las hojas sintomáticas (con cuatro grupos de severidad: 1-20 %, 21-40 %, 41-60 %, 61-80 %), asintomáticas y sanas.

## Estudio 10. Detección por fluorescencia como herramienta para calcular la calidad y los rendimientos del aceite de palma (Norul Husna y cols., 2015)

El método tradicional para evaluar la calidad y el rendimiento del aceite de palma suele ser destructivo, costoso y laborioso. La detección por fluorescencia brinda una nueva forma de evaluar la calidad y el rendimiento del aceite de palma de manera no destructiva. Este trabajo describe la utilización de un sensor multiparamétrico de fluorescencia (Multiplex<sup>®</sup>) para calcular la calidad y el rendimiento del aceite de palma mediante la cuantificación de la concentración de metabolitos secundarios como la antocianina y el flavonol en los racimos de frutas frescas y las frutas sueltas de palmas de tres edades

diferentes (6, 9 y 12 años después de la siembra en campo). Los resultados muestran que los índices detectados por fluorescencia son un medio práctico no destructivo para estimar la calidad y el rendimiento del aceite de palma en tres grupos diferentes (Tablas 10 y 11). En las palmas de 6 y 9 años de edad, la fuerza de estimación de los metabolitos secundarios fue más pronunciada con respecto a la calidad del aceite (Tabla 12). Por otro lado, en las palmas de 9 y 12 años la fuerza de estimación de los metabolitos secundarios fue más pronunciada con respecto al rendimiento del aceite (Tabla 12). En general, las determinaciones tanto de la calidad como del rendimiento del aceite de palma por medio de los índices de fluorescencia tienen su mayor aplicabilidad en las palmas de 9 años. Los metabolitos secundarios como la antocianina y el flavonol son indicadores fiables de la calidad y el rendimiento del aceite de palma.

**Tabla 10.** Correlación entre los índices de fluorescencia (ANTH y FLAV) y las concentraciones medidas de antocianina (TAC) y flavonol (TFC) comparando palmas de diferentes edades.

Año de siembra (edad)	Índice de fluorescencia	TAC (mg g <sup>-1</sup> )	TFC (mg g <sup>-1</sup> )
2002 (12)	ANTH	0,56*	-
	FLAV	-	0,79*
2005 (9)	ANTH	0,57*	-
	FLAV	-	0,76*
2008 (6)	ANTH	0,62*	-
	FLAV	-	0,54*

\* Significativo al nivel de p = 0,05.

**Tabla 11.** Correlación entre los índices de fluorescencia (ANTH y FLAV) comparando diferentes partes de la palma de aceite analizada (racimo y frutas sueltas) y palmas de diferentes edades.

Año de siembra (edad)	Parte analizada	ANTH	FLAV
		Frutas sueltas	
2002 (12)	Racimo (RFF)	0,59*	0,59*
2005 (9)		0,54*	0,59*
2008 (6)		0,79*	0,60*

\* Significativo al nivel de p = 0,05.

**Tabla 12.** Correlación entre los índices de fluorescencia (ANTH, FLAV y NBI) y los atributos de calidad (DOBI<sup>1</sup>) y rendimiento del aceite de palma (OER<sup>2</sup>) comparando palmas de diferentes edades.

Año de siembra (edad)	Índice de fluorescencia	DOBI	OER
2002 (12)	ANTH	+0,15	+0,53*
	FLAV	+0,28	+0,57*
	NBI	-0,71*	+0,28
2005 (9)	ANTH	+0,63*	+0,65*
	FLAV	+0,52*	+0,53*
	NBI	-0,13	+0,17
2008 (6)	ANTH	+0,77*	+0,45
	FLAV	+0,67*	+0,16
	NBI	-0,44	+0,20

1 Índice de Grado de Blanqueabilidad. 2 Tasa de extracción del aceite. \* Significativo al nivel de p = 0,05.

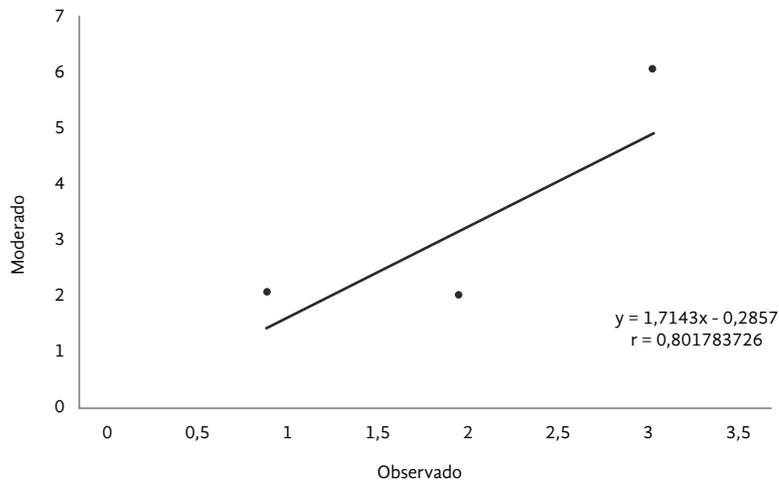
### Estudio 11. Un método de detección remota para estimar la densidad de siembra en palma de aceite (Balasundram y cols., 2009)

Este trabajo demuestra el potencial de utilizar las imágenes satelitales como medio para realizar el censo de árboles en palma de aceite. El estudio se efectuó en

una plantación comercial localizada en Sagil, Johor, Malasia. Se obtuvieron imágenes satelitales de archivo (2005) de la plantación a través de Google Earth, con una resolución espacial de 4 m y sin costo alguno. Se demarcaron cinco lotes de estudio (polígonos) sobre las imágenes con base en el año de siembra y el tipo de suelo. Cada polígono se georreferenció para ayudar con las observaciones directas en el terreno (*ground truthing*). Las imágenes se procesaron con

la herramienta de 'marca' de MapInfo con base en el patrón del dosel en la proyección del nadir. Los resultados mostraron una correlación elevada entre el número de árboles contados en las imágenes de Google Earth y el conteo en el terreno (Figura 21). Este

hallazgo sugiere que la detección remota por satélite puede ofrecer otro medio para calcular la densidad de siembra de la palma de aceite. Esta técnica no solamente es efectiva en términos de costos sino que también tiene una precisión razonable.



**Figura 21.** Conteo de puntos sin sembrar: observado (vía satélite) vs. medido (en el terreno).

## Referencias

- Balasundram, S.K., P.C., Robert, D.J., Mulla, and D.L., Allan (2006a). Relationship between oil palm yield and soil fertility as affected by topography in an Indonesian plantation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 37(9&10): 1321-1337.
- Balasundram, S.K., P.C., Robert, D.J., Mulla, and D.L., Allan (2006b). Spatial variability of soil fertility variables influencing yield in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) *Asian Journal of Plant Sciences*, 5(2): 397-408.
- Balasundram, S.K., D.J., Mulla, and P.C., Robert. (2006c). Accounting for spatial variability in a short-term fertilizer trial for oil palm. *International Journal of Soil Science*, 1(3): 184-195.
- Balasundram, S.K., P.C., Robert, and D.J., Mulla (2006d). Relationship between oil content and fruit surface color in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Journal of Plant Sciences*, 1(3): 217-227.
- Balasundram, S.K., M.H.A., Husni, and A.R., Anuar (2008). *A computerized digital imaging technique to estimate crude palm oil based on fruit surface color*. Copyright document (stamped on March 10, 2008), Kuala Lumpur, Malaysia.
- Balasundram, S.K., K.I., Ahmad Fadhil, and Nini Sopian (2009). A remote sensing approach to estimate stand density in oil palm. *Journal of ISSAAS* (International Society of Southeast Asian Agricultural Sciences), 15(1): 188 (Abstract).
- Balasundram, S.K., H. Memarian, and R. Khosla (2013). Estimating oil palm yields using Quick-Bird-derived vegetation Indices. *Life Science Journal*, 10(4): 851-860.
- Chew, P.S. (1997). Prospects for Precision Plantation Practices in Oil Palm. *AAR Technical Report No. 6/97/CPS*. Applied Agricultural Research Sdn. Bhd., Sungai Buloh, Selangor, Malaysia.

- Chew, P.S., and E. Pushparajah (1995). Nitrogen management and fertilization of tropical plantation tree crops. In: P.E. Bacon (ed.) *Nitrogen Fertilization in the Environment*. Marcel Dekker, New York.
- Emmot, A, J. Hall, and R. Matthews (1997). The potential for precision farming in plantation agriculture. In: J.V. Stafford (ed.) *Proc. Precision Agriculture '97* (Volume I). Bios Scientific Publishers Ltd., Oxford, United Kingdom.
- Foster, H.L., and A.M. Tarmizi (1988). *Variations in the fertilizer requirements of oil palm in Peninsular Malaysia*. I. Within the same series. Palm Oil Research Institute of Malaysia (PORIM) Bulletin No. 16: 1-9.
- Law, M.C., S.K. Balasundram, M.H.A., Husni, O.H., Ahmed, and M.H. Harun (2009). Spatial variability of soil organic carbon in oil palm: A comparison between young and mature stands. *International Journal of Agricultural Research*, 4(12): 402-417.
- Ng, S.K., and K. Selvadurai (1967). Scope of using detailed soil maps in the planting industry in Malaysia. *Malaysian Agricultural Journal*, 46: 158-163.
- Norul, Husna, A.K., S.K. Balasundram, and C.P. Tan (2015). Fluorescence sensing as a tool to estimate palm oil quality and yield. *Ciência e Técnica Vitivinícola Journal*, 30(4): 58-65.
- Robert, P.C. (1999). Precision agriculture: Research needs and status in the USA. In: J.V. Stafford (ed.) *Proc. Precision Agriculture '99* (Volume I). Society of Chemical Industry (SCI), London, United Kingdom. pp. 19-33.
- Selvaraja, S., S.K., Balasundram, G., Vadamalai, M.H.A., Husni and R. Khosla (2014). Remote sensing as a tool to assess orange spotting disease in oil palm (*Elaeis guineensis*). *Mitteilungen Klosterneuburg*, 64(4): 12-26.