ASD Oil Palm Papers (Costa Rica), N° 33, 40-47. 2009

Dinámica del sistema radical de la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) en respuesta a la fertilización mineral y orgánica en suelos de áreas afectadas por pudriciones del cogollo

Albertazzi H[1]., Chinchilla C. Ml[2]. Ramírez C[3].

Resumen

Se siguió la dinámica del sistema radical de palmas aceiteras jóvenes en suelos afectados por pudriciones de cogollo, los cuales fueron enmendados con fertilización orgánica o mineral. Se utilizó la metodología de sacos de muestreo, la cual consiste en enterrar, a aproximadamente 30 cm de profundidad, sacos de un material de lenta degradación dentro de los cuales se colocaron los tratamientos deseados. Los tratamientos usados en los sacos fueron: 1) suelo de una área con alta incidencia de PC (suelo 1) sin enmienda (testigo uno), 2) el mismo suelo enmendado con 100 g de fertilizante químico (18-5-15-6-0,2), 3) ese suelo enmendado con 10% (p/p) de compost hecho a partir de racimos vacíos de palma aceitera, y 4) suelo de un área con baja incidencia de PC (Suelo 2: testigo dos). Un grupo de sacos de cada tratamiento se extrajo del suelo a los 2, 4, y 6 meses después de iniciado el experimento para evaluar el sistema radical.

Durante el periodo experimental en 1999 se observó un incremento gradual en la cantidad total de raíces. El mayor aumento en la cantidad de materia seca de raíces totales se encontró en el tratamiento tres (alta incidencia de PC enmendado con compost), excepto en el segundo muestreo. Con respecto al sistema radical grueso, se encontraron resultados erráticos, los cuales pueden deberse a una variación estacional causada por el patrón de lluvias, y no a una respuesta a los tratamientos. El crecimiento del sistema radical fino (raíces IIl y lV) fue más constante en el tiempo. En todos los tratamientos se observó un aumento de este tipo de raíces con el tiempo. La enmienda del suelo 1 con fertilizante químico, promovió inicialmente un mejor crecimiento de raíces finas, pero ese efecto no fue duradero y luego la masa radical pareció reajustarse a las condiciones nutricionales intrínsecas del suelo usado. El efecto del tratamiento con compost fue más duradero, probablemente debido a que el compost acompleja parte de sus elementos nutricionales y se comporta como un fertilizante de lenta liberación. Aunque las diferencias en la cantidad de raíces entre tratamientos parecían bastante evidentes, las mismas no resultaron significativas, ya que la variabilidad en la cantidad de raíces entre plantas y tratamientos fue muy grande; lo cual es normal para esta variable en la que es común observar una variabilidad mayor a 20%. No obstante, el usar cada planta como un bloque o repetición ayudó a reducir dicha variabilidad. En forma complementaria se corrió un análisis de regresión entre el peso de la muestra de raíces (gramos) y la longitud de estas (milímetros), encontrándose un modelo lineal con un valor de R^2 de 0,76 y una probabilidad < 0,01 para la familia de datos del ámbito de muestras entre 0 y 7 gramos. El modelo para estimar el valor de *lre* (longitud radical específica) con el peso en gramos de muestras dentro del ámbito señalado, facilitará el análisis e interpretación de futuros experimentos en los que se contemplen éste tipo de variables.

[1] ASD de Costa Rica, h.albertazzi@asd-cr.com; 2. Consultor para ASD, cmlchinchilla@gmail.com; Universidad de Costa Rica, Fac. Ciencias Agroalimentarias

Introducción

La investigación de los efectos de diferentes prácticas agrícolas sobre la dinámica del sistema radical de la palma aceitera es escasa, y la mayoría de los estudios se han enfocado en la descripción de la distribución espacial de las raíces (Forde 1972, Tinker 1976, Tan 1979, Agamuthu y Broughton 1986, Goh y Samsudin 1993, Jourdan y Rey 1997). Algunos de estos estudios han mostrado el efecto positivo del riego, la nutrición equilibrada y las prácticas de labranza, sobre el desarrollo saludable del sistema radical y la parte aérea de la planta. El beneficio de todos estos factores es mayor durante los primeros cinco años después del trasplante.

El problema fitosanitario más importante de la palma aceitera en el Pacífico central y la región Atlántica de Costa Rica es conocido como "flecha seca", y corresponde con lo que en Suramérica se denomina "pudrición del cogollo" o PC. Existe evidencia de que este tipo de problema está relacionado con la salud del sistema radical de la planta (Chinchilla y Durán 1998, Albertazzi et al. 2005). El trastorno es de naturaleza no letal, y las plantas normalmente se recuperan luego de varios meses de sufrir 'amarillamientos', secamientos y pudriciones en las flechas (hojas sin abrir) y otros tejidos del cogollo.

El desorden de la PC puede ser el producto acumulado de alteraciones fisiológicas que en presencia de un elemento disparador, como una fuerte sequía o anegamiento prolongado, asociado a veces a una alta carga de racimos anterior, pueden conducir a un agotamiento de la planta y su exposición al ataque de organismos patógenos oportunistas. Este complejo ha sido asociado también con un deterioro del sistema radical (Chinchilla y Durán 1998).

Existen pocos estudios sobre el desarrollo del sistema radical en los suelos de áreas afectadas por la PC; por lo cual este trabajo tuvo como objetivo estudiar la dinámica del sistema radical de palmas aceiteras jóvenes en suelos en áreas afectadas por la PC, los cuales fueron enmendados con fertilización orgánica o mineral.

Materiales y métodos

Se realizó un experimento en 1999 con palmas de 14 meses de edad en el campo, sembradas en la zona del Pacífico Central de la Provincia de Puntarenas, cantón de Aguirre. La siembra anterior había sido afectada por la PC y se resembró con la variedad Deli/Yangambi x Ekona. La zona es de topografía plana, con suelos de origen aluvial; clasificados mayormente como Inceptisoles (Pérez et al. 1978).

Se utilizó la metodología de sacos de muestreo descrita por Bhöm (1979), la cual consiste en enterrar sacos de un material de lenta degradación a 30 cm de profundidad cerca del tronco de la palma. Dentro de los sacos se coloca un sustrato en el que se desea evaluar el desarrollo de las raíces. Se utilizaron sacos dobles confeccionados con cedazo de fibra de vidrio, con una capacidad de 12 litros; los cuales fueron identificados con una etiqueta marcada con el tratamiento, el grupo y la repetición correspondiente.

Se utilizaron dos tipos de suelo. El suelo 1 provenía de un sitio con alta incidencia de PC, y el suelo 2 de un sitio con baja incidencia. El suelo 1 fue enmendado con fertilizante químico (100 g de 18-5-15-6-0,2: tratamiento 2) o con compost (10% (p/p) de compos hecho a partir de racimos vacíos de palma aceitera: (tratamiento 3). Los controles fueron el suelo 1 sin enmiendas (tratamiento 1), y el suelo 2, también sin enmiendas (tratamiento 4). Cada tratamiento se repitió cinco veces.

Se emplearon 15 palmas dispuestas en tres grupos de cinco. En cada palma y en puntos equidistantes, se aplicaron los cuatro tratamientos, de modo que cada grupo de cinco plantas constituyó un diseño de bloques completos al azar con cinco repeticiones, en el que cada palma era un bloque. El sistema radical dentro de los sacos (método destructivo) fue evaluado a los 2, 4 y 6 meses después de iniciado el experimento. En total se colocaron 60 sacos provenientes de los cuatro tratamientos con cinco repeticiones y las tres fechas de evaluación.

Durante cada muestreo, se eliminaron las raíces que salían de los sacos, el contenido interno se colocó dentro de un recipiente plástico de 20 litros y se extrajeron las raíces manualmente. Posteriormente, se pasó el contenido de cada saco a través de un tamiz con perforaciones de 1 mm² para separar las raíces finas restantes.

Seguidamente, se separaron manualmente las raíces por categorías en gruesas (primarias y secundarias) y finas (terciarias y cuaternarias), de acuerdo con la clasificación del sistema radical de palma aceitera (Cuadro 1). Luego de clasificadas, las raíces fueron colocadas en bolsas de papel y secadas en un horno a 65°C por 48 horas para determinar su materia seca.

Cuadro 1. Principales características morfológicas de las raíces de la palma aceitera[1]

Clasificación anatómica	Tipología	Diámetro (mm)	Longitud (cm)	Longevidad (meses)	Ramificación
Primarias	horizontal	5	600	>6	+
	vertical	6.5	2500	1 - 6	+
Secundarias (II)	horizontal	2	200	1 - 6	+
	geotropismo +	2.2	600	1 - 6	+
	geotropismo -	1.5	50	1 - 6	+
Terciarias (III)	superficial	1	20	<1	+
	profunda	1	10	<1	+
Cuaternarias (IV)	---	0.5	1.5	<1	-

[1] Adaptado de Jourdan and Rey 1997. Signo + denota que ese tipo de raíces se ramifica. + en geotropismo significa geotropismo positivo.

Para determinar la longitud total de la muestra de raíces, se utilizó el análisis de imagen obtenida por medio del escaneo de la muestra. Para el análisis posterior de la imagen se utilizó el programa ROOTEDGE versión 2,2c (Kaspar y Ewing 1997). La 'longitud radical específica' (*lre*) de la muestra de raíces se determinó a partir de la siguiente ecuación (Bhöm, 1979):

lre = longitud total de las raíces / materia seca de las mismas

Generalmente, la *lre* se refiere a la longitud total de un gramo de peso seco de raíces, por lo que se expresa en las unidades mm/g (Goh y Samsudin 1993). Para realizar el análisis estadístico, la variable *lre* fue transformada a log (*lre*) para el ANDEVA, en la cual se consideró que al no haberse asignado las palmas en forma aleatoria a las tres fechas de muestreo, estas constituyeron experimentos individuales, de manera que se tenían tres experimentos (coincidentes con las tres fechas de evaluación), con los mismos tratamientos y el mismo diseño experimental.

Las medias de tratamientos se compararon mediante contrastes: suelo 1 (con PC: tratamiento 1) vs suelo 2 (baja incidencia de PC: tratamiento 4), suelo 1 + fertilizante químico (tratamiento 2) vs suelo 1 (tratamiento 1) y suelo 1 + compost (tratamiento 3) vs suelo 1 (tratamiento 1).

Los resultados del análisis químico de los suelos y el compost utilizados como sustrato o complemento del sustrato con que se rellenaron los sacos, aparecen en los cuadros 2 y 3). La lluvia acumulada por mes durante el periodo de cada muestreo se detalla en la figura uno.

Cuadro 2. Característica químicas de los suelos y del compost utilizado como sustrato en los sacos de muestreo

	pH	N	P	K	Ca	Mg	Al	Ac	CICE	S	Zn	B	Fe	Mn	Cu
		$cmol^{(+)}/l$								**mg/l**					
Referencia	-	-	15	0.5	4	1	-	-	-	4	3	0.5	30	30	5
Suelo 1	4.9	nd	0	0.2	16	2.7	0.9	0.9	20.3	8	3	1	164	113	17
Suelo 2	6.8	nd	7.1	0.1	29	4	nd	0.1	33.3	nd	1	nd	46	3	5
					%							**mg/kg**			
Compost	nd	4.6	2.5	4.4	4.6	0.7	nd	nd	nd	nd	455	32	4126	184	39

Los suelos 1 y 2 provenían de sitios con alta y baja incidencia de PC, respectivamente. nd = no determinado

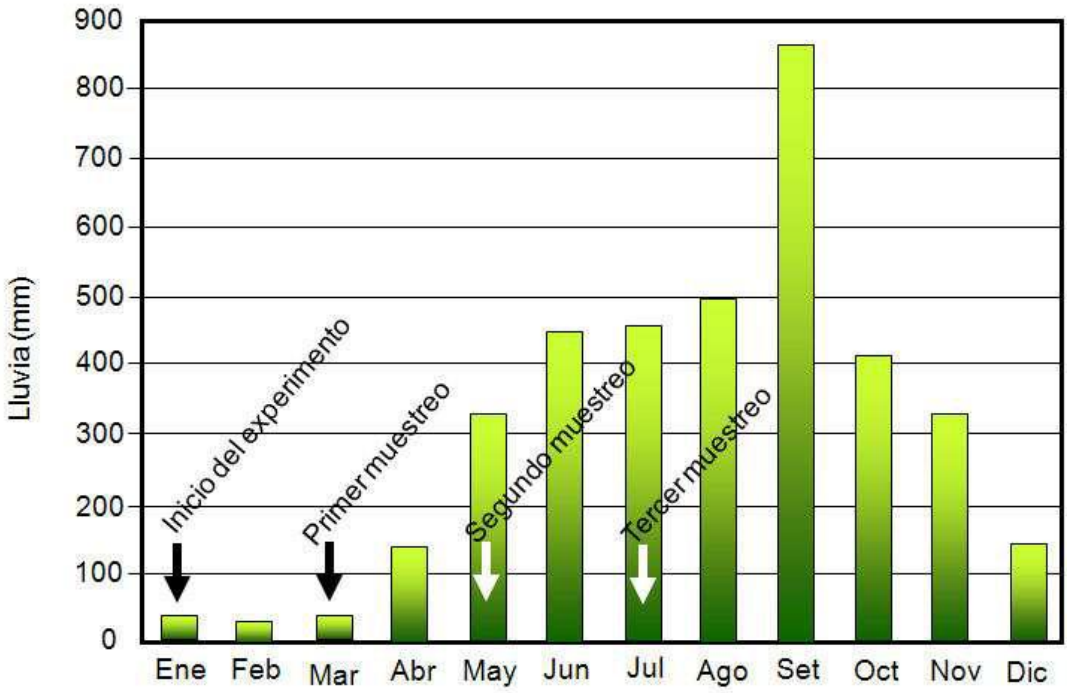


Fig. 1. Lluvia (mm) acumulada por mes en 1999 (Estación meteorológica, Damas, Quepos, Puntarenas). Las flechas marcan el inicio del experimento y las fechas de muestreo.

Cuadro 3. Relaciones entre bases en los suelos utilizados como sustrato en los sacos de muestreo de raíces

	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	Ca+Mg/K
Referencia	2.5	5 - 25	2.5 - 15	10 - 40
Suelo 1	6	80	14	30
Suelo 2	7	323	45	74

Suelos 1 y 2 provenían de sitios con alta y baja incidencia de PC, respectivamente

Resultados y discusión

Las observaciones se iniciaron durante el periodo menos lluvioso del año y finalizaron cuando las lluvias ya se habían establecido. Durante este periodo experimental se observó una tendencia a un incremento gradual en la cantidad total de raíces; excepto en el tratamiento con el suelo en donde la incidencia de la PC fue baja, y en el cual el incremento observado fue variable, notándose una disminución en el contenido de raíces en el segundo muestreo. En éste sentido, la tasa de mayor incremento en materia seca de raíces totales correspondió al tratamiento con el suelo 1 (alta incidencia de PC) enmendado con compost (Fig. 2C), aunque no hubo diferencias estadísticas significativas.

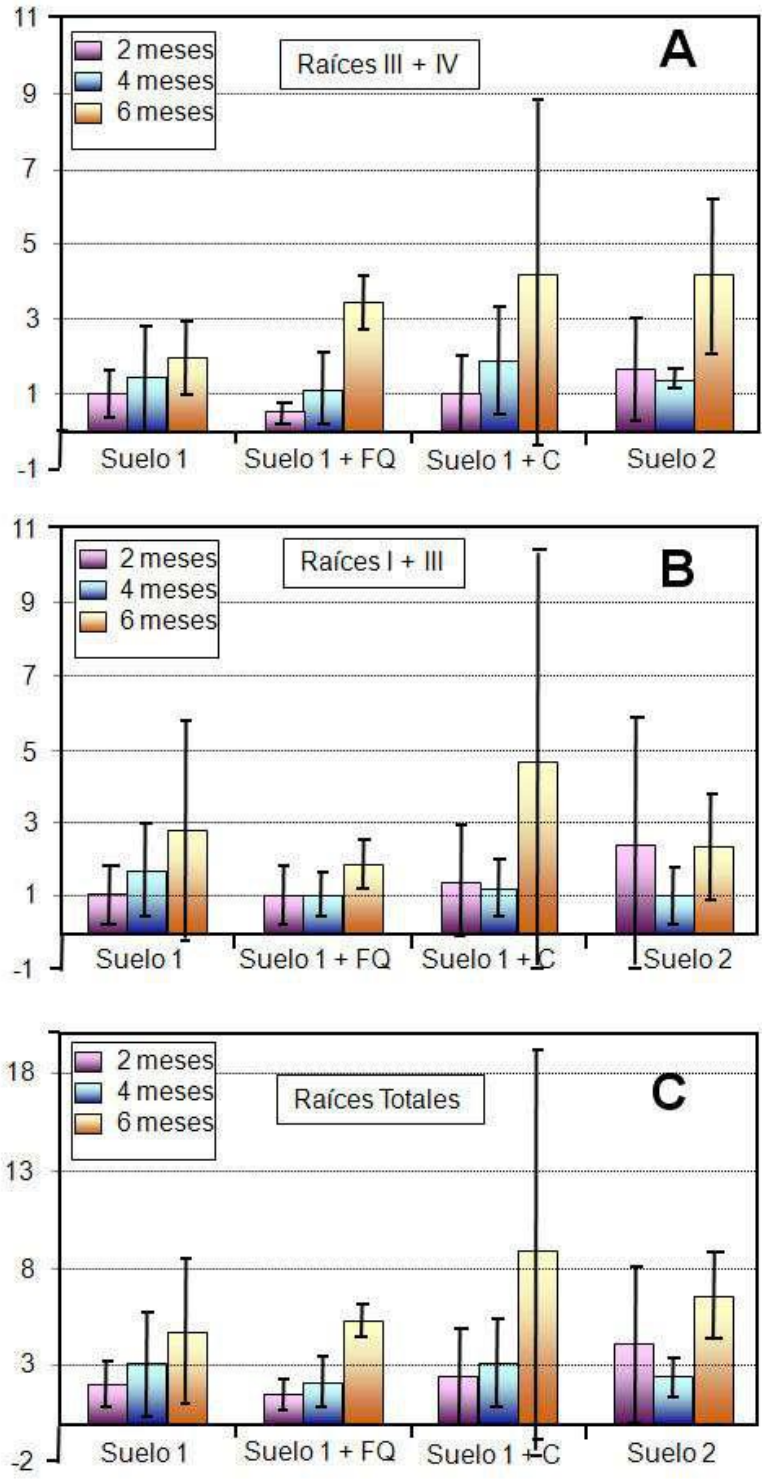


Fig. 2. Materia seca (g) de raíces gruesas (I + II) (A), finas (III + IV) (B) y totales (C) desarrolladas dentro de sacos que contenían suelo proveniente de dos sitios con alta (suelo 1) y baja incidencia de PC (sitio2). El suelo 1 fue enmendado con compost de racimos vacíos de palma aceitera (C) o con fertilizante químico (FQ). Datos para tres fechas de muestreo a los 2, 4 y 6 meses después de enterrados los sacos. Palmas de 14 meses de edad.

La variación en la cantidad de raíces primarias y secundarias fue errática (Fig. 2A). En el caso del tratamiento con el suelo 1, se observó una tendencia a un aumento constante en la cantidad de raíces gruesas conforme pasó el tiempo. No obstante, cuando este suelo fue enmendado con compost o fertilizante químico, se encontró una disminución en la cantidad de este tipo de raíces durante el segundo muestreo; lo cual también ocurrió en el suelo 2 (baja incidencia de PC). Durante el tercer muestreo la situación cambió, y se determinó un aumento importante en la producción de raíces gruesas, especialmente en el tratamiento con el suelo 1 enmendado con compost. Los resultados erráticos encontrados con el desarrollo del sistema radical grueso pueden deberse a una variación estacional causada por el inicio de la temporada de lluvias, y no a una respuesta a los tratamientos (Hartley 1977, Ruer 1967, Alvarado y Sterling 1993).

La respuesta del sistema radical fino (raíces IIl y lV) fue un poco más constante en el tiempo (Fig. 2B), aunque no hubo diferencias estadísticas significativas. En todos los tratamientos se observó la tendencia a un incremento de estas raíces con el tiempo. La mayor tasa de incremento ocurrió a los seis meses, en donde el tratamiento con el suelo 1 (alta PC) enmendado con compost presentó en promedio la mayor cantidad de raíces, seguido por los tratamientos cuatro (suelo 2: baja incidencia) y dos (suelo 1 + fertilizante químico). En general, este último tratamiento presentó en los diferentes muestreos, los valores menores de materia seca, tanto de raíces gruesas como finas.

Fue aparente que la enmienda del suelo 1 (alto PC) con el fertilizante químico promovió inicialmente un mejor crecimiento del sistema radical fino (mayor *lre*), pero este efecto no fue duradero (Fig. 3). En el resto de los tratamientos la *lre* fue similar. No obstante, durante el segundo muestreo, los valores de *lre* cayeron en este tratamiento. Al finalizar el experimento (tercer muestreo a los seis meses de iniciado), la mayor *lre* fue para el tratamiento con el suelo uno sin enmendar).

El efecto estimulante sobre el sistema radical del fertilizante químico fue relativamente de poca duración, y luego la masa radical disminuyó, por lo que pareció reajustarse a las condiciones nutricionales naturales del suelo dentro de los sacos de muestreo. Esta respuesta ha sido descrita en otros cultivos, en donde, cuando un sustrato es nutricionalmente variable, la planta invertirá menos recursos en la formación de nuevas raíces en las áreas más ricas; pues la mayor concentración de nutrientes le permitirá obtener lo que necesita con una menor masa radical (Van Noordwijk et al. 1996).

En palma aceitera se ha observado que, aunque el sistema radical es fuertemente influenciado por el clima, puede ocurrir que las raíces finas respondan con un crecimiento "instantáneo" hacia algún sitio en particular (Jourdan y Rey 1997). Sin embargo, la vida media de estas raíces puede ser muy corta, lo que implica un desgaste energético para la planta. Los autores anteriores encontraron que las raíces de tipo cuaternario presentaron una vida media de tres a cuatro semanas y se separaban de la raíz terciaria que las soportaba un mes después de muertas. Lo anterior implica que un lapso de dos meses podría ser muy prolongado para observar el efecto de un tratamiento; si lo deseado es cuantificar las raíces cuaternarias.

El mayor crecimiento de raíces en sitios con mejores condiciones (mayor fertilidad por ejemplo) se conoce como crecimiento en parches, en el cual las raíces absorbentes responden a la riqueza

nutricional de un sitio con la producción de raíces finas, en procura de capturar los nutrimentos temporalmente disponibles.(Arnone 1997, Charlton 1997). Ruer (1967) utilizando fósforo marcado, encontró que las raíces finas eran las encargadas de la absorción de éste elemento.

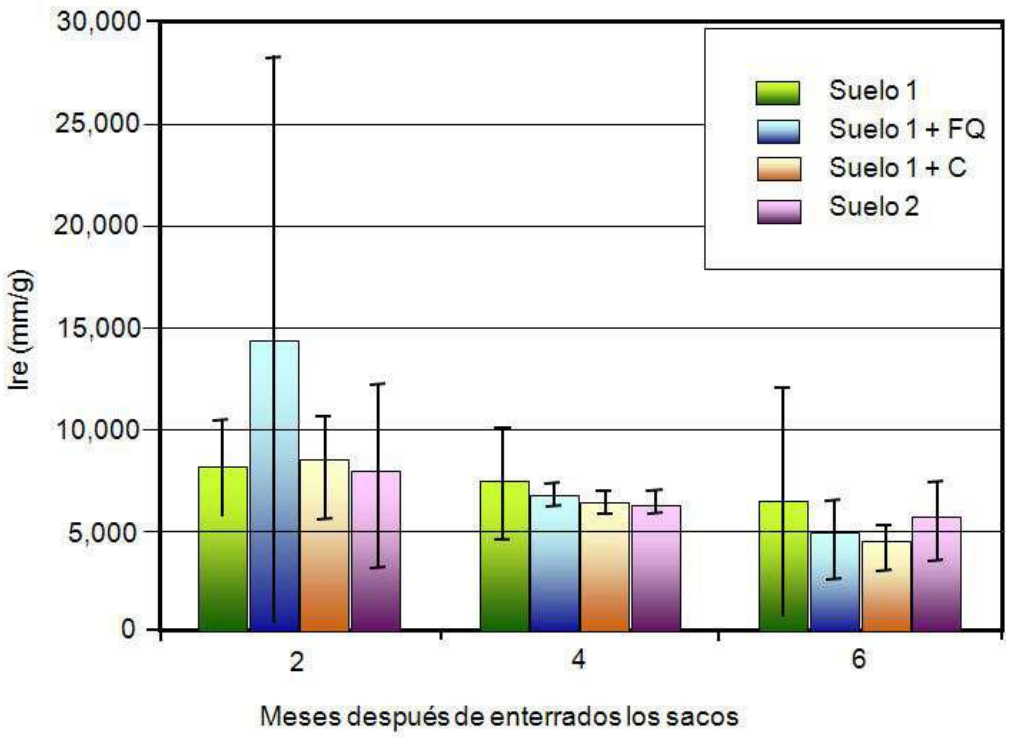


Fig. 3. Longitud radical específica (*lre*) en milímetros por gramo en muestras de raíces desarrolladas dentro de sacos con suelo de dos sitios con alta (sitio 1) y baja (sitio 2) incidencia de PC. El suelo del sitio con alta incidencia fue enmendado con compost de racimos vacíos de palma aceitera (C) o con fertilizante químico (FQ). Datos para las tres fechas de muestreo a los 2, 4, y 6 meses de edad.

El efecto del tratamiento con compost fue más duradero debido quizás al comportamiento del compost como un fertilizante de lenta liberación; cualidad que le otorgan sus componentes de más lenta degradación, y la capacidad de acomplejar parte de sus elementos nutricionales. La planta podría entonces mantener por más tiempo las raíces viables, dado que el sustrato en el cual se desarrollaron permanece brindándoles recursos (Grime et al. 1991). Esto podría explicar el porqué aún seis meses después de colocado el tratamiento, se observó un efecto del mismo. Durante la última fecha, el valor de la lre fue aproximadamente 35% menor con respecto a la primera evaluación (Fig. 4).

Las diferencias en la cantidad de raíces entre tratamientos, aunque aparentemente bastante evidentes, no fueron significativas, ya que la variabilidad en la cantidad de raíces entre plantas y tratamientos fue muy grande; lo cual es normal para esta variable, en donde es común encontrar una variabilidad mayor a 20%. No obstante, la utilización de cada planta como un bloque o repetición ayudó a reducir esta variabilidad.

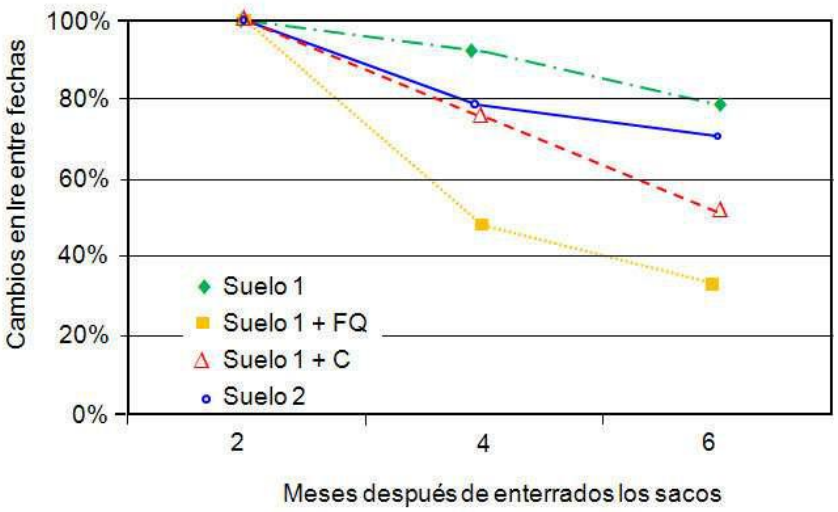


Fig. 4. Cambio en la longitud radical específica (*lre*) entre cada una de las fechas de muestreo (2, 4, y 6 meses después de colocados los tratamientos) tomando como base la primera fecha. Suelos con alta (sitio1) y baja (sitio 2) incidencia de PC. El suelo del sitio con alta incidencia fue enmendado con compost de racimos vacíos de palma aceitera (C) o con fertilizante químico (FQ). Datos para las tres fechas de muestreo a los 2, 4 y 6 meses después de enterrados los sacos. Palmas de 14 meses de edad.

Adicionalmente, se corrió un análisis de regresión entre el peso de la muestra de raíces y la longitud de éstas, encontrándose un modelo lineal con valor de R^2 de 0,76 y una probabilidad < 0,01 para la familia de datos del ámbito de muestras entre 0 y 7 gramos (Fig. 5).

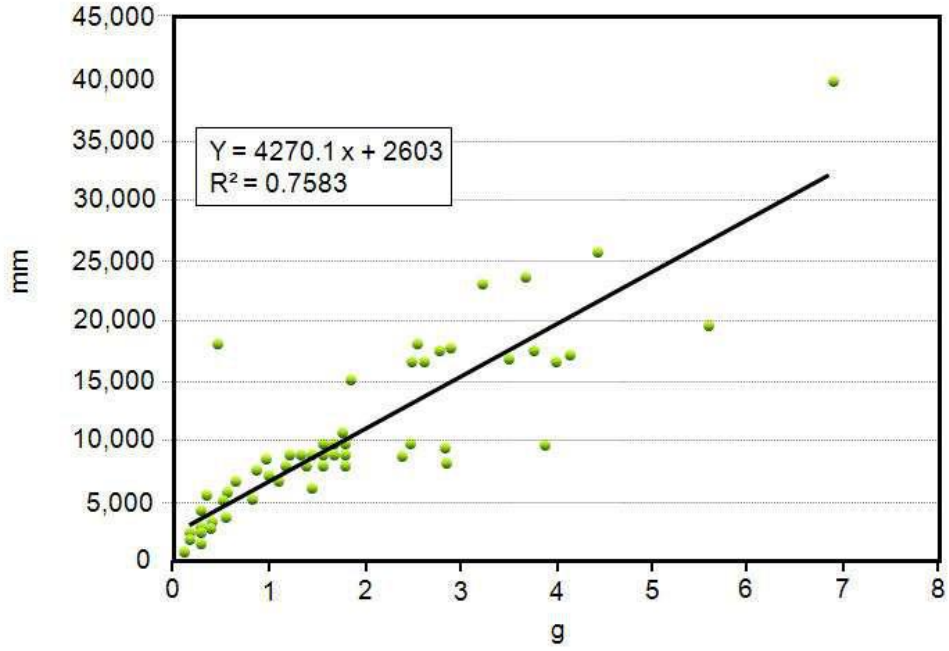


Fig. 5. Análisis de correlación entre la materia seca de raíces finas (III + IV) en muestras tomadas de sacos de muestreo, y la longitud radical total de las mismas, indistintamente de los tratamientos y fechas de muestreo**.**

Conclusiones

Es importante definir los beneficios netos para la planta, en términos de productividad, de la estimulación en la formación de nuevas raíces como respuesta temporal a la fertilización química (aumento de poca duración en la cantidad de nuevas raíces) vs la respuesta a mediano y largo plazo que parece lograrse con la aplicación de compost. En esta misma línea de pensamiento, se debe evaluar la capacidad de la planta para regenerar su sistema radical después de eventos fuertes como el estrés hídrico causado ya sea por exceso o falta de agua, la alternancia en condiciones hídricas extremas, anoxia e impedimento físico para el crecimiento.

La muestra de suelo tomada en el sitio en donde la incidencia de la pudrición de cogollo era mayor, aparentemente no tenía ninguna característica particular intrínseca que impidiera el mejoramiento de su fertilidad y condiciones físicas mediante enmiendas, tendientes a mejorar la cantidad y calidad del sistema radical y con ello ayudar a reducir la incidencia y severidad de este desorden.

La determinación de la *lre* en muestras de raíces finas de palma es tediosa y consume mucho tiempo y se requiere de equipo especial para ello, así como de personal entrenado para ese fin. Se determinó que un modelo lineal de regresión permitía estimar el valor de *lre* a partir del peso seco en gramos de una muestra. Este procedimiento facilita el análisis e interpretación de datos obtenidos de experimentos en donde se contemplen éste tipo de variables.

Literatura

Albertazzi, H. Bulgarelli, J. Chinchilla, C. 2005. Onset of spear rot symptoms in oil palm and prior (and contemporary) events. ASD Oil Palm Papers, 28: 21-41

Agamuthu, P.; Broughton, W. J. 1986. Factors affecting the development of the rooting system in young oil palms (Elaeis guineensis Jacq.). Agriculture, Ecosystems and Environment 17: 173-179.

Alvarado, A.; Sterling, F. 1993. Evaluación del patrón de distribución del sistema radical de la palma aceitera (Elaeis guineensis Jacq.). Agronomía Costarricense 17(1): 41-48.

Arnone, J. A. 1997. Temporal responses of community fine roots populations to long term elevated atmospheric CO2 and soil nutrient patches in model tropical ecosystems. Acta Oecologica 18(3): 367-376.

Bhöm, W. 1979. Methods of studying root systems. Springer-Verlag. Berlin. 190 p.

Charlton, W. A. 1997. Lateral root initiation. In: Plant roots the hidden half. Second Edition. Edited by Waisel, Y.; Eshel, A. and Kafkafi, U. Marcel Dekker. 1002 p.

Chinchilla C.; Durán, N. 1998. Manejo de problemas fitosanitarios en palma aceitera: una perspectiva agronómica. Palmas, Colombia. 19 (número especial): 242-256.

Forde, S. C. M. 1972. Effect of dry season drought on uptake of radioactive phosphorus by surface roots of the oil palm (Elaeis guineensis Jacq.). Agronomy Journal 64: 622-623.

Goh, K. J.; Samsudin, A. 1993. The root system of the oil palm (Elaeis guineensis, Jacq.) II: Indirect estimations of root length, diameter and surface area. Elaeis 5(2): 75-85.

Grime, J. P.; Campbell, B. D.; Mackey, J. M. L. 1991. Root plasticity, nitrogen capture and competitive ability. In Plant root growth: an ecological perspective. Edited by Atkinson, D. Special Publication of the British Ecological Society #10. 381-397.

Hartley, C. W. S. 1977. La palma de aceite. México, Editorial Continental. 958 p.
Jourdan, C.; Rey, H. 1997. Modeling and simulation of the architecture and development of the oil palm (Elaeis guineensis Jacq.) root system. I. The Model. Plant and Soil. 190: 217-233.
Kaspar, T. C.; Ewing, R. P. 1997. Rootedge: software for measuring root length from desktop scanner images. Agronomy Journal 89: 932-940.
Pérez, S.; Alvarado, A.; Ramírez, E. 1978. Asociación de sub-grupos de suelos de Costa Rica: hoja Quepos. San José, Costa Rica. Oficina de planificación sectorial agropecuaria. Esc. 1:200.000.
Ruer, P. 1967. Morphologie et anatomie du système radiculaire du palmier a huile. Olèagineux 22(10): 595-599.
Tan, K. S. 1979. Root development of oil palm on inland soils of west Malaysia. Section 6.5. In: Soil Physical properties and crop production in the tropics, p. 363-374.
Tinker, P. B. 1976. Soil requirements of the oil palm. Chapter 13. In: Oil Palm Research, Developments in Crop Science (1). Editorial Elsevier. Amsterdam, Holanda, p. 165-181.
Van Noorwijk, M.; Lawson, G.; Soumáre, A.; Groot, J. J. R.; Hairiah, K. 1996. Root distribution of trees and crops: competition and/or complementarity. In: Tree-Crop Interaction: A Physiological Approach. Edited by Ong, C. K. and Huxley, P. Editorial CAB International. Oxford, England, p 319-364.

ASD Oil Palm Papers (Costa Rica), N° 33, 17-32. 2009

Características del suelo y desarrollo radical en palma aceitera joven (*Elaeis guineensis* Jacq.) en sitios afectados por pudriciones del cogollo

Albertazzi H., Chinchilla, C. Ml., Ramírez C.

Resumen

Se buscaron relaciones entre algunas características físicas del suelo con el desarrollo del sistema radical y la condición sanitaria de la parte aérea en palmas aceiteras jóvenes. El estudio se realizó en dos sitos en la costa pacífica de Costa Rica, en los que la plantación anterior había sido afectada por pudriciones de cogollo. Se establecieron tratamientos como un diseño de parcelas divididas, donde las parcelas grandes fueron dos suelos con características físicas y químicas diferentes, y las sub-parcelas, suelo subsolado y no subsolado.

La dinámica del sistema radical se determinó mediante observaciones espaciadas en el tiempo. Se utilizaron ventanas para observación cavadas directamente al lado de las plantas y también se extrajeron muestras de raíces con un barreno para determinar su peso seco y el estado sanitario. A través de las ventanas de observación se determinó el tipo de raíz y su ubicación en el espacio en una cuadrícula.

En el periodo que siguió a la siembra de las plantas, la primera tendencia observada fue el desarrollo preferente del sistema radical grueso (raíces primarias y secundarias), presumiblemente en busca de anclaje y para asegurar un suministro adecuado de agua en anticipación a cualquier posible evento de déficit hídrico. El desarrollo de sistema radical fino (raíces terciarias y cuaternarias) durante los primeros meses posteriores al trasplante fue escaso. No obstante, aproximadamente un año después de la siembra, las plantas ya habían desarrollado un sistema fino importante. El crecimiento de raíces finas ocurrió en parches, posiblemente debido a las condiciones heterogéneas del suelo (diferencias en condiciones físicas y de fertilidad). En palmas de dos años de edad, la mayor parte del sistema fino de raíces se encontró en los primeros 20 cm bajo la superficie, y todo el sistema (fino y grueso) estuvo concentrado entre 20 y 40 cm bajo la superficie.

La presencia de un nivel freático alto y fluctuante se asoció con una menor densidad de raíces finas y gruesas a través del perfil del suelo. Asimismo, una mayor resistencia a la penetración (compactación) encontrada en la parcela sin subsolar se consideró un impedimento para el desarrollo del sistema radical. La presencia de horizontes o capas con valores de resistencia a la penetración mayores de 1,2 MPa se asoció con una menor proliferación de raíces en algunas regiones de suelo. Una menor fertilidad (particularmente potasio y alta relación Mg/K) también se asoció con el menor desarrollo radical y eventualmente con una mayor incidencia de pudriciones de cogollo.

El uso de 30 plantas por repetición fue suficiente para declarar diferencias significativas (5%) para la densidad de raíces con el barreno holandés. El método de perfiles es una alternativa para el estudio del sistema radical en palma aceitera. Una gran variabilidad entre palmas fue observada en los muestreos del sistema radical.

Introducción

La mayoría de los estudios sobre raíces en palma aceitera se enfocan en aspectos sobre la distribución del sistema radical (Alvarado y Sterling 1993; Forde 1972; Tinker 1976; Tan 1979; Agamuthu y Broughton 1986; Jourdan y Rey 1997). En varias investigaciones se ha encontrado el efecto positivo de algunas prácticas como el riego, la nutrición equilibrada y la labranza, sobre el desarrollo saludable del sistema radical y la parte aérea de la planta. La influencia positiva se acentúa si esas prácticas son realizadas durante los primeros cinco años después del trasplante.

La dinámica del crecimiento de raíces en el tiempo y el espacio depende de la interacción de factores como el clima, el manejo y la calidad del sitio donde se sembró la planta. La calidad del sitio se puede definir como el efecto integral de la fertilidad, la física, la química y la biología del suelo seleccionado.

El sistema radical de la palma aceitera se divide anatómicamente en cuatro sistemas: raíces primarias (I), secundarias (II), terciarias (III) y cuaternarias (IV). Las primeras dos se definen como raíces de anclaje y transporte de agua y solutos, y las dos últimas como raíces de absorción de agua y nutrientes (junto con los puntos de crecimiento de las raíces I y II). Las raíces III y IV presentan una longitud máxima de pocos centímetros por lo que se pueden considerar raíces de tipo colonizador, mientras que las raíces I y II se consideran pioneras ya que preceden la aparición de las raíces absorbentes y presentan mayores longitudes (Jourdan y Rey 1997, Ruer 1967). Las condiciones del sitio pueden modificar la capacidad pionera y colonizadora del sistema radical en palma aceitera.

En el Pacífico Central de Costa Rica se presentó una alta incidencia de la condición conocida como ‘flecha seca’, cuyos síntomas corresponden a lo que se conoce como pudrición del cogollo’ (PC) en varios países de Sur América. El trastorno es de naturaleza no letal, y las plantas normalmente se recuperan luego de varios meses de sufrir ‘amarillamientos’, secamientos y pudriciones de las flechas y otros tejidos del cogollo (Chinchilla y Durán 1999).

El desorden de la PC puede ser el producto acumulado de alteraciones fisiológicas, las que en presencia de un elemento disparador, como una fuerte sequía o anegamiento prolongado, aunado con una alta carga previa de racimos, pueden conducir al agotamiento de la planta, que la deja expuesta al ataque de organismos patógenos oportunistas. Este complejo y otros similares han sido asociados también con un deterioro del sistema radical (Alvarado et al. 1997, Chinchilla y Durán 1998; Chinchilla y Escobar 2004). En Colombia, por ejemplo, Acosta y Munevar (2002) encontraron que la incidencia de PC fue mayor en los suelos más compactados (valores de resistencia a la penetración de 1.58 MPa versus 1.07 Mpa).

Existen pocos estudios sobre el desarrollo del sistema radical en suelos afectados por la PC. Algunos investigadores se han enfocado en la arquitectura y distribución espacial de las raíces o en la relación entre síntomas aéreos y el deterioro de las raíces (Albertazzi et al. 2005).

El objetivo de este estudio fue conocer la dinámica radical en plantas de palma aceitera sembradas en un sitio en donde la plantación anterior había sido afectada por la PC.

Materiales y métodos

Las observaciones se realizaron entre los meses de mayo del año 1998 y junio 2000, en la zona de Quepos, en el Pacífico Central de Costa Rica. Esta zona se caracteriza por tener una estación seca bien definida entre los meses de enero y abril, y un pico de lluvias en setiembre y octubre (Fig. 1). Los suelos, cuyo régimen de humedad es ústico, son de origen aluvial, sobre topografía plana o suavemente ondulada y se les clasifica dentro del orden de los Inceptisoles (Taxonomía de suelos del USDA).

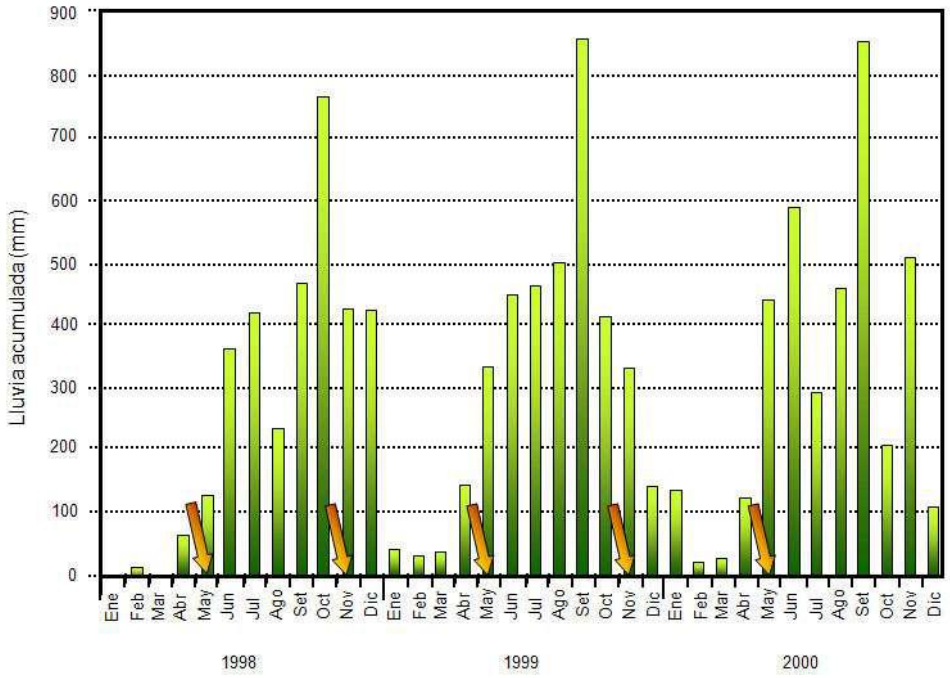


Fig. 1. Precipitación pluvial mensual acumulada en milímetros por mes para el período 1998-2000. Las flechas denotan las fechas de muestreo.

Se utilizó un diseño de parcelas divididas en donde la parcela grande correspondió a dos tipos de suelo con diferentes características físicas y químicas, y las sub-parcelas correspondieron a la práctica de subsolado o no subsolado del suelo. Se utilizaron plantas procedentes de semilla sexual de la variedad Deli x Kigoma / Ekona (DxK/E). Las plantas se sembraron entre finales de abril e inicios de mayo de 1998.

El suelo del sitio dos, clasificado por Núñez (1996) como Typic Eutropept, presentaba la particularidad de tener un nivel freático fluctuante por efecto de marea; el cual no se logró eliminar por completo con el trabajo de drenaje realizado. Este suelo también presentaba un menor contenido de potasio. En el suelo del sitio uno, clasificado como Fluvaquentic Eutropept, el problema de drenaje era menor (texturas menos finas) y no tenía el efecto de las mareas. Además, su contenido de potasio era mayor. Ambos sitios se encuentran a 8 msnm cerca de la costa pacífica. Según Núñez (1996), este suelo se originó de sedimentos aluviales y presenta un epipedón ócrico y un endopedón cámbico. Las principales características físicas y químicas de ambos suelos se muestran en el cuadro 1. En ambos sitios, la incidencia de la PC en la siembra

anterior afectó más de 60% de las plantas; por lo cual se trató de corregir las deficiencias del sistema de drenaje antes de iniciar la nueva siembra.

Cuadro 1. Características físicas de los perfiles de dos suelos utilizados en el estudio de la dinámica del sistema radical. Tomados de un estudio semi detallado de clasificación de suelos Nuñez (1996)

Sitio	Horizonte	Profundidad	Densidad (partículas)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase textural
1	Ap	0 - 16	2.51	29	45	26	Franco
	Bw	16 - 55	2.64	61	23	16	Franco arenoso
	C1	55 - 78	2.58	41	37	22	Franco
	C2	78 - 79	2.52	45	37	18	Franco
	C3	99 - 130	2.60	33	39	28	Franco arcilloso
2	Ap	0 - 8	2.59	39	33	28	Franco arcilloso
	Bw	8 - 23	2.50	50	27	23	Franco arcillo arenoso
	C1	23 - 70	Nd	Nd	Nd	Nd	Gravilla

Nd = no determinado

La dinámica del sistema radical se evaluó de dos formas: con un barreno tipo holandés (Eijkelkamp, http://www.eijkelkamp.com) y mediante la instalación de ventanas de observación según fue descrito por Bhöm (1979). En el caso del barreno holandés, se tomaron muestras de la capa superficial (0-20 cm de profundidad) de 30 plantas en cada repetición a un metro de distancia del tallo, según la recomendación de Rapidel (1998). Las variables evaluadas fueron peso seco del sistema de raíces gruesas (Tipo I y II) y raíces finas (Tipo III y IV). Una vez tomadas y etiquetada cada muestra, el volumen de suelo (750 cc) se colocó en cubetas con agua por cinco minutos, para propiciar el desprendimiento del suelo y facilitar la extracción de las raíces sin dañarlas. El contenido de la cubeta se pasó por una criba fina y se realizó un lavado con agua a baja presión. Las muestras ya lavadas se separaron por tamaños en raíces gruesas y finas y se colocaron en bolsas de papel y se secaron para obtener su peso seco (70°C por tres días). Se realizaron cuatro muestreos espaciados seis meses, empezando un mes después de la siembra.

Antes de secar las muestras de raíces se procedió a evaluar su estado fitosanitario; para lo cual se utilizó una escala visual con cuatro categorías: 1). Hasta 25% de deterioro del sistema radical, 2). Entre 25% y de 50% de deterioro, 3). Entre 50 y 75% de deterioro, 4). Entre 75 y 100% de

deterioro (Anexo 1). A esta variable se le llamó 'raíz corchosa' debido al aspecto de las raíces deterioradas. El porcentaje de deterioro se calculó con la siguiente fórmula:

$$Deterioro\ (\%) = \frac{Valor\ observado}{4}\ x\ 100$$

Donde el valor observado oscila entre 0 y 4.

La dinámica del sistema radical 'in situ' se evaluó con el método de observación en un perfil de suelo, según lo describe Bhöm (1979). Este método consiste en la excavación de una calicata al lado de la planta: un metro de profundidad, un metro de ancho (frontal a la planta) y 1.20 metros de largo, con escalones para el acceso (Fig. 2).

Fig. 2. Calicata para el seguimiento de la dinámica radical. La pared para la evaluación se construyó a 20 cm, centrada en la palma. Esta planta particular desarrolló ‘pudrición del cogollo’

Luego de realizar la primera medición del sistema radical expuesto (20 cm a lo largo del perfil), se colocó un vidrio de un metro cuadrado plenamente ajustado a la pared frontal de la calicata. El vidrio se cubrió con un plástico negro (para evitar la entrada de luz) y sobre éste se colocó un

plástico blanco para evitar el sobrecalentamiento del suelo. Además, cada calicata se protegió con un techo construido con sacos de polipropileno para evitar la acumulación de agua de lluvia dentro de la misma y la incidencia directa de la luz del sol sobre la cara de evaluación.

Cada seis meses se quitó el plástico de cada planta y se colocó una pieza de policarbonato transparente sobre el vidrio. Esta pieza tenía dibujada una cuadrícula de un metro cuadrado con líneas cada cinco centímetros (20 líneas horizontales y 20 líneas verticales), que formaban cuadros de 25 cm^2.

La primera fecha de evaluación con la cuadrícula fue a los seis meses de sembradas las palmas en el campo; en total se realizaron cuatro mediciones espaciadas seis meses entre sí. Las variables evaluadas fueron el recuento del número de raíces por tipo (primarias, secundarias y terciarias más cuaternarias) y su ubicación (distribución) en cada cuadro de 25 cm^2.

Durante la época lluviosa del segundo año después de la siembra, se determinó la resistencia a la penetración en sitios cercanos a cada una de las palmas en las que se excavaron las calicatas. Para ello, se utilizó un penetrómetro de mano marca Eijkelkamp (http://www.eijkelkamp.com) de tipo analógico, utilizando el cono #2 de 15.96 mm de diámetro, con un ángulo de 60 grados. Las evaluaciones se realizaron en forma posterior a una de lluvia de 50 mm, esperando dos días para la infiltración del exceso de agua. Las mediciones se realizaron por triplicado en la zona posterior de la rodaja de aquellas palmas con ventanas de observación. Las mediciones se tomaron cada cinco centímetros hasta un metro de profundidad. Todas las evaluaciones se realizaron en un mismo día de trabajo.

Resultados y discusión

Evaluación del sistema radical con el barreno holandés

Densidad de raíces. Se encontraron diferencias significativas para la interacción entre el sitio y el método de preparación del suelo para la variable densidad de raíces finas (P=0.002, DMS 5%). En el sitio dos (suelo menos aireado) se presentó una menor densidad de raíces en la parcela no subsolada (Fig. 3). El desarrollo del sistema radical fino (raíces terciarias y cuaternarias) fue relativamente pobre durante el primer mes posterior al trasplante. La densidad radical encontrada fue de 0.39 gramos de raíces totales por litro; donde 36% fueron raíces finas.

Aproximadamente seis meses después de la siembra, la densidad de raíces había aumentado 4.3 veces en el sitio uno (suelo mejor aireado), indicando que la planta había desarrollado un sistema radical importante en busca de agua y nutrientes. La densidad de raíces en ese momento fue de 1.69 g/l; y el sistema fino representaba 49% del total de raíces. Este comportamiento del sistema radical fundamenta la práctica de colocar el fertilizante muy cerca de la planta durante los primeros meses después de la siembra. Luego de seis meses aproximadamente, la aplicación del abono se puede ampliar a la primera mitad de la rodaja o círculo libre de malezas.

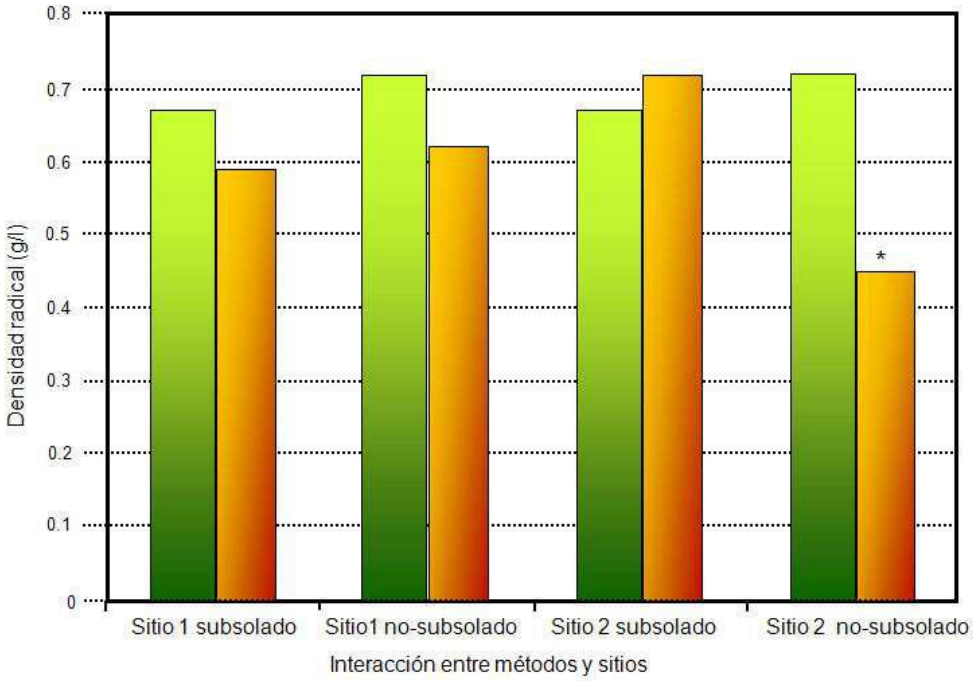


Fig. 3. Densidad (g/l) de raíces totales (finas + gruesas) de palma aceitera en muestras de barreno (750 cm^3) para dos sitios con condiciones diferentes de suelo (sitio dos con nivel freático fluctuante), y con o sin subsolado. Muestreo cada seis meses, empezando al mes de siembra. * el asterisco denota diferencias estadísticas. P= 0.001, DMS 5%

Sanidad del sistema radical. No se encontraron diferencias en la sanidad de las raíces que pudiesen atribuirse al efecto del subsolado, pero sí al tipo de suelo. No hubo interacción entre sitios y la práctica de subsolado. El mayor deterioro del sistema radical se observó en el sitio uno (P=0.005, DMS 5%) con 38%. En todo caso, para efectos agronómicos, las muestras de raíz del sitio dos presentaron 33% de deterioro, lo cual también se considera muy alto.

El deterioro paulatino del sistema radical fue evidente en ambos sitios aún antes de la aparición de palmas con síntomas externos de pudriciones de cogollo o PC (Fig. 4), lo cual ocurrió antes de la evaluación a los 18 meses. Este mismo fenómeno fue observado en otros experimentos, en donde se encontró que el deterioro del sistema radical -inicialmente en calidad y luego en cantidad- antecedía a la manifestación externa de los síntomas de flecha seca o PC (Albertazzi et al. 2005).

La aparente mayor capacidad de las plantas en el sitio uno de mantener una mayor densidad de raíces finas (compensando en parte las deterioradas), se asoció con una menor incidencia posterior de PC en esa área (menor a 5%). Esta ventaja aparente no se observó en la parcela no subsolada del sitio dos, en donde la incidencia de PC fue mayor posteriormente.

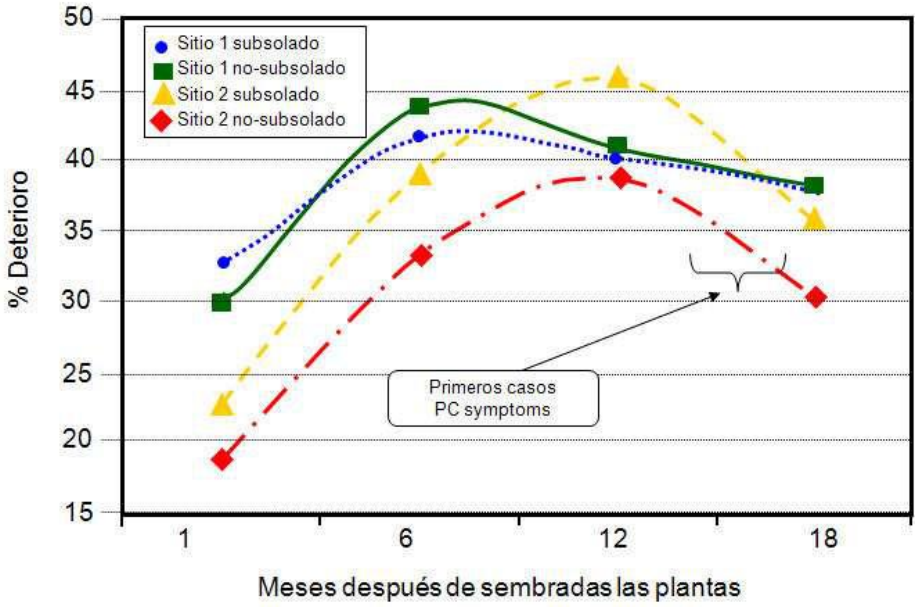


Fig. 4. Evolución en el grado de deterioro del sistema radical de palma aceitera joven en muestras tomadas con barreno, en dos sitios (sitio dos con nivel freático fluctuante) con parcelas subsoladas o no. Cuatro fechas de muestreo (a los 1, 6, 12 y 18 meses después de la siembra)

Evaluación de la dinámica del sistema radical con el método de perfiles (ventanas de observación)

Luego de la siembra en el campo, las palmas favorecieron el desarrollo del sistema radical grueso (raíces primarias y secundarias), el cual ayuda al anclaje y la exploración de capas más profundas del suelo en busca de agua (Figs. 5-8).

A los dos años de edad, la mayor parte de las raíces gruesas se concentró en los primeros 20 a 40 cm de profundidad, y el sistema fino se ubicó principalmente en la capa superficial de 20 cm de espesor. Este mismo comportamiento fue observado por Barrios (1998) en suelos en Venezuela clasificados como Ultisoles y Vertisoles. De igual manera, Armas et al. (2005), trabajando con trincheras para estudiar el sistema radical de palmas de pejibaye (*Bactris gassipaes*) de un año de edad, encontraron que la mayoría de las raíces finas y gruesas estaban en los primeros 20 cm de profundidad y cercanas al tallo; lo cual parece ser una característica de las Palmaceas en general, al presentar un sistema radical de tipo fasciculado. En palmas aceiteras adultas (16 años), Cristancho et al. (2007) encontraron que la mayoría de las raíces crecía en los primeros 30 cm del suelo y en un círculo de 4.5 metros de radio alrededor de la base del tallo.

La evaluación a los seis meses después de la siembra, indicó lo acontecido durante la primera estación lluviosa. En este sentido se puede observar un pobre desarrollo tanto de raíces gruesas como finas. El sistema grueso se concentró entre los 20 y 30 cm de profundidad; mientras que las raíces finas brotaron en forma más superficial, especialmente en el sitio con mayores problemas de aeración.

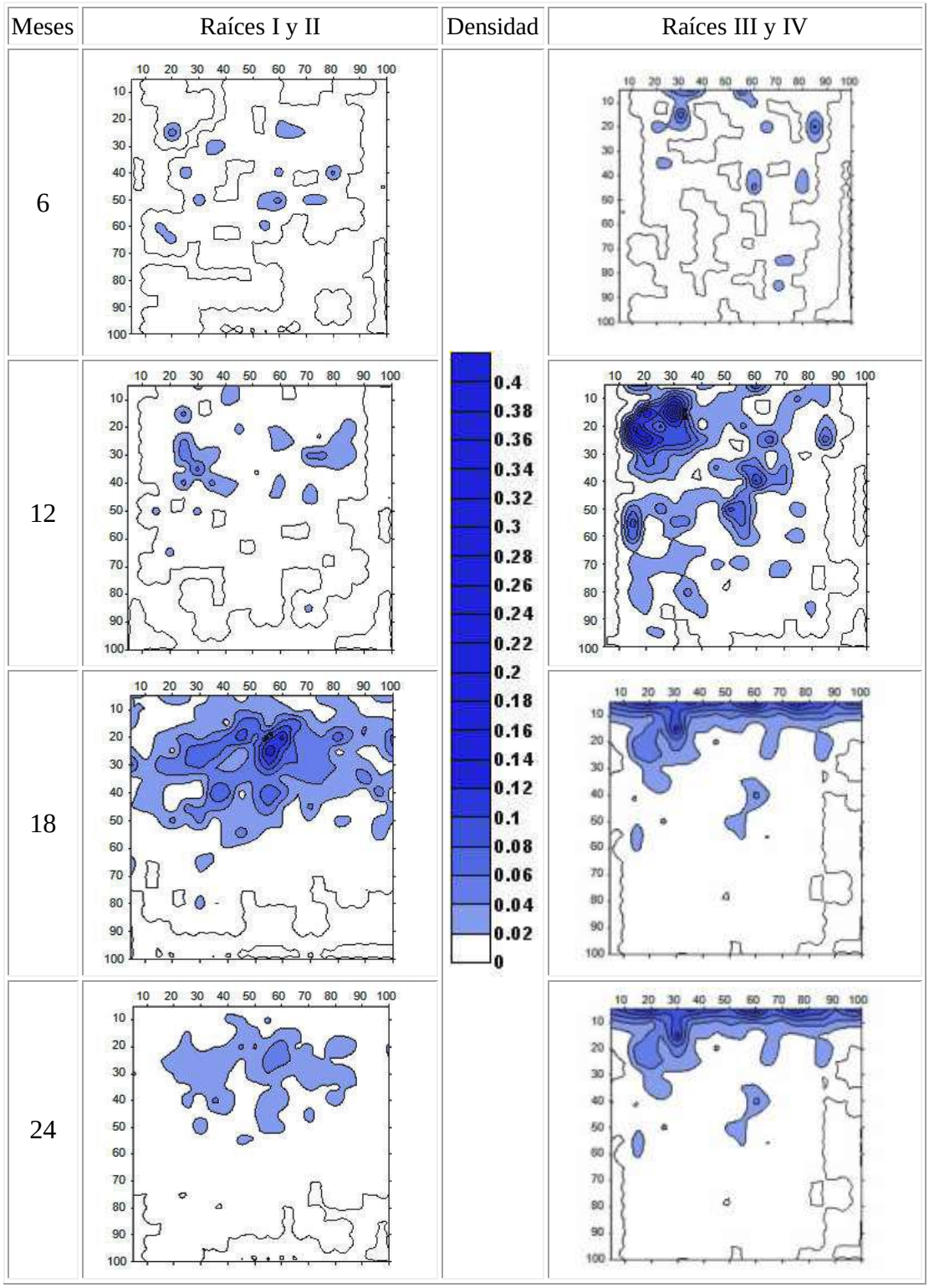


Fig. 5. Densidad de raíces/cm² y su distribución en una cuadrícula (1m²) en el suelo con mejor aeración en la parcela subsolada. Cuatro fechas de evaluación después de la siembra.

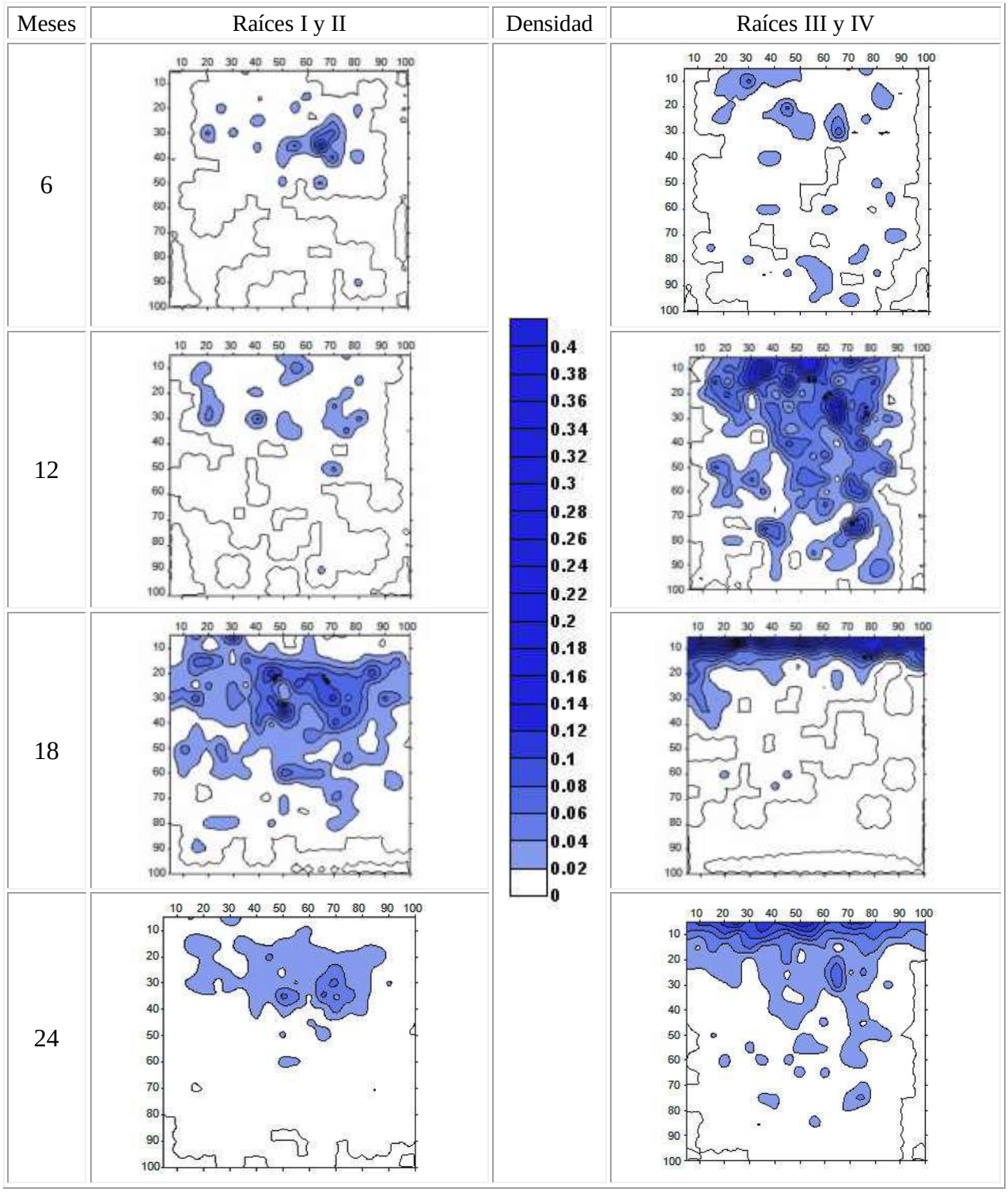


Fig. 6. Densidad de raíces/cm² y su distribución en una cuadrícula (1m²) en el suelo con mejor aeración en la parcela no subsolada. Cuatro fechas de evaluación después de la siembra.

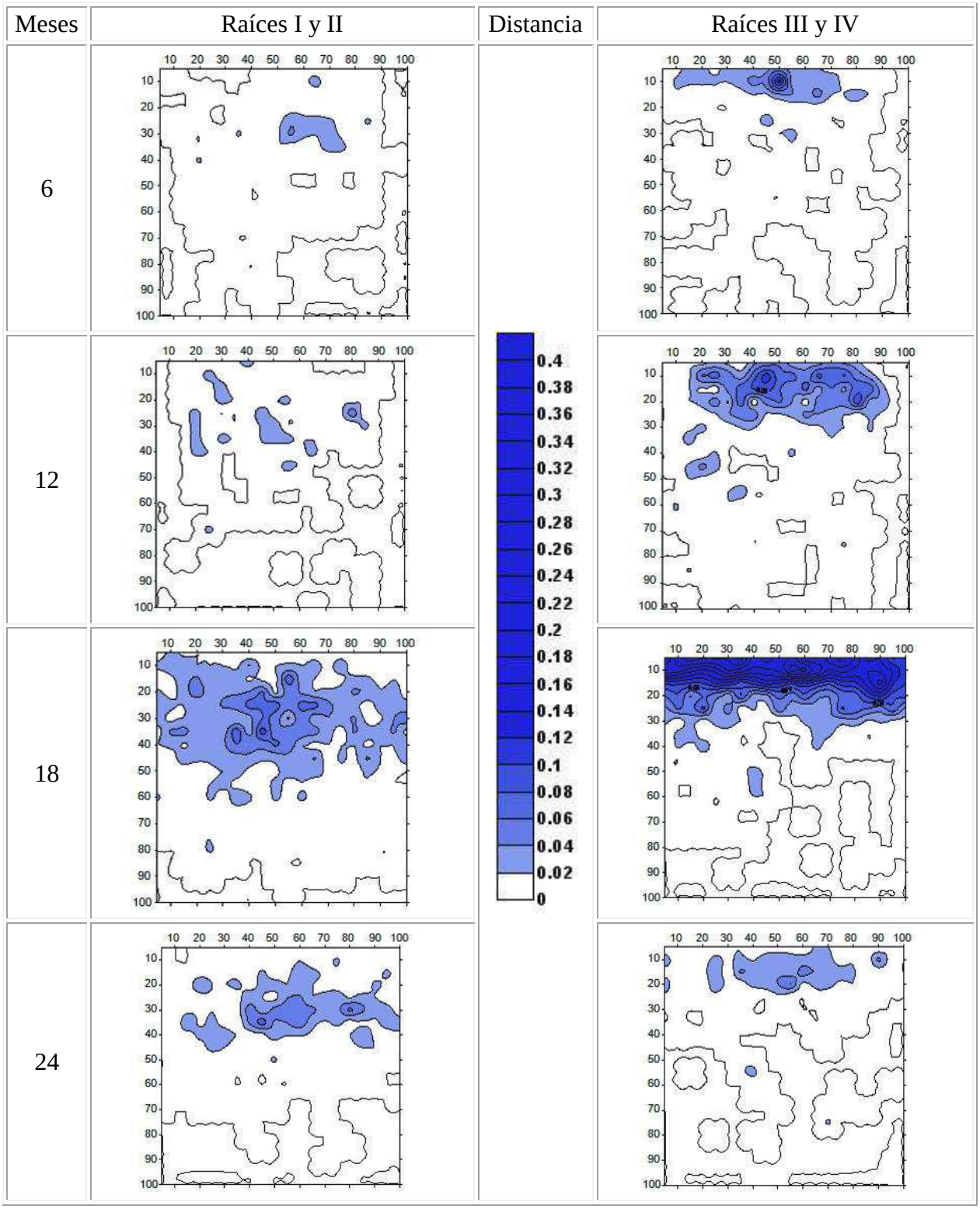


Fig. 7. Densidad de raíces/cm² y su distribución en una cuadrícula (1m²) en el suelo con aeración pobre en la parcela subsolada. Cuatro fechas de evaluación después de la siembra.

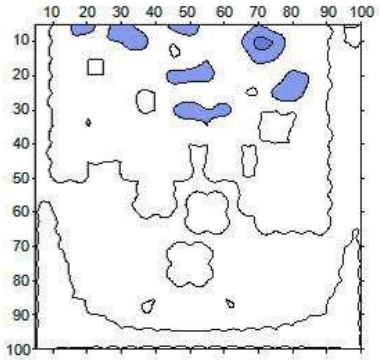
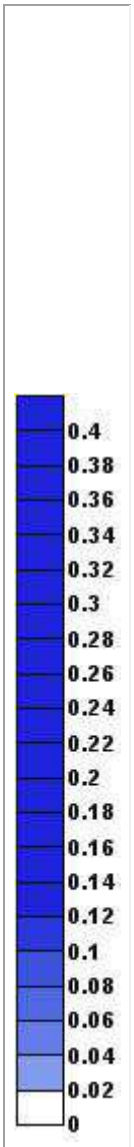
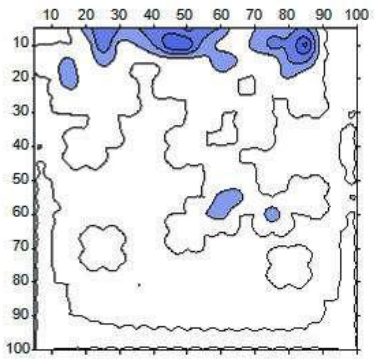
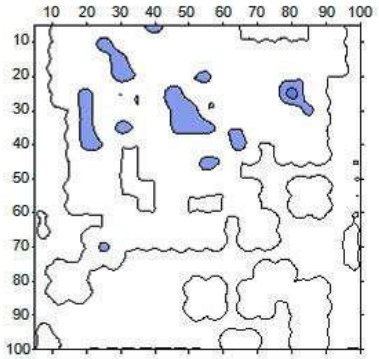
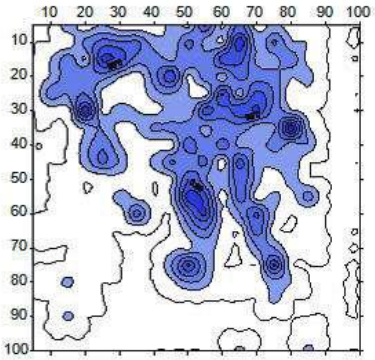
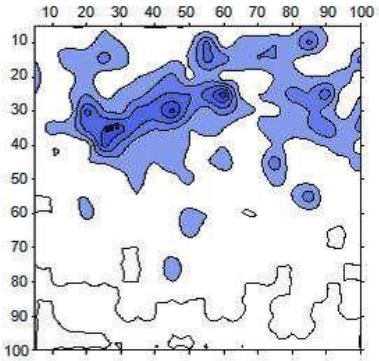
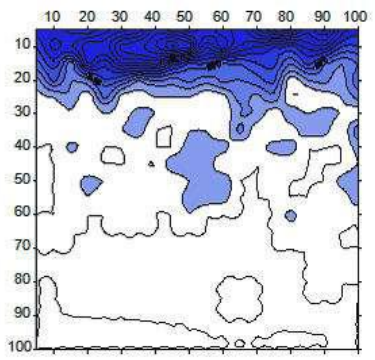
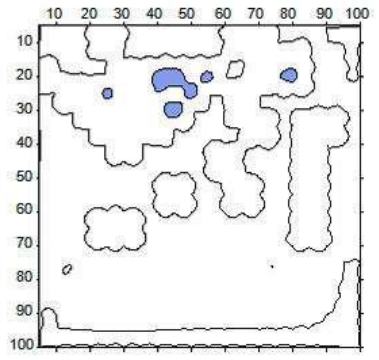
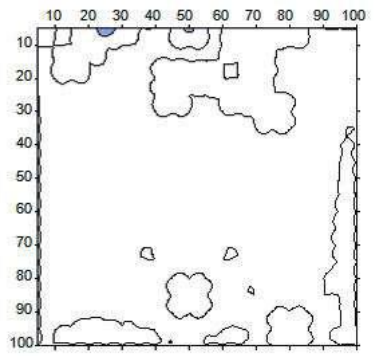
Meses	Raíces I y II	Densidad	Raíces III y IV
6			
12			
18			
24			

Fig. 8. Densidad de raíces/cm² y su distribución en una cuadrícula (1m²) en el suelo con aeración pobre en la parcela no subsolada. Cuatro fechas de evaluación después de la siembra.

En la segunda fecha de evaluación (periodo que incluyó la primera época seca después de la siembra), fue notoria la emisión de un mayor número de raíces finas a mayor profundidad. Durante la tercera fecha de muestreo (18 meses después de sembradas las plantas) se reflejó el efecto de la segunda época lluviosa, en la cual lo más destacable fue la emisión de raíces finas en ambos sitios en forma muy superficial. En ambos sitios aparecieron raíces gruesas entre los 20 y 50 cm de profundidad; pero la emisión fue mayor en el sitio mejor aireado.

Para la cuarta y última evaluación (dos años después de la siembra en campo), fue evidente el efecto marcado de la época seca del año 2000. En éste caso, el mayor efecto adverso se observó en el sitio menos aireado, en donde se observó una disminución drástica en la densidad de raíces finas y gruesas en comparación con el suelo mejor aireado.

Con el método de perfiles o ventanas de observación se hizo evidente, desde la primera fecha de evaluación, un crecimiento del sistema radical en forma de parches tanto de las raíces gruesas como de las finas. La dinámica de raíces varió en el tiempo y en el espacio; posiblemente debido a un efecto combinado de la interacción entre las condiciones hídricas y la fertilidad del suelo (Arnone 1997). Van Noorwijk et al. (1996) encontraron que el crecimiento de las raíces tenía una respuesta a las características físicas y químicas del sustrato; lo que indica una alta plasticidad para responder a condiciones de crecimiento disímiles (Grime et al. 1993).

La mayor abundancia de raíces totales (80-90%) en el perfil de suelo se observó en los primeros 50 cm (Fig. 9). En general, este comportamiento había sido observado por Barrios (1998) en palmas cultivadas en Venezuela. Considerando este hecho, el análisis estadístico se realizó con la densidad de raíces a dos profundidades, de 0-50 cm y 55-100 cm.

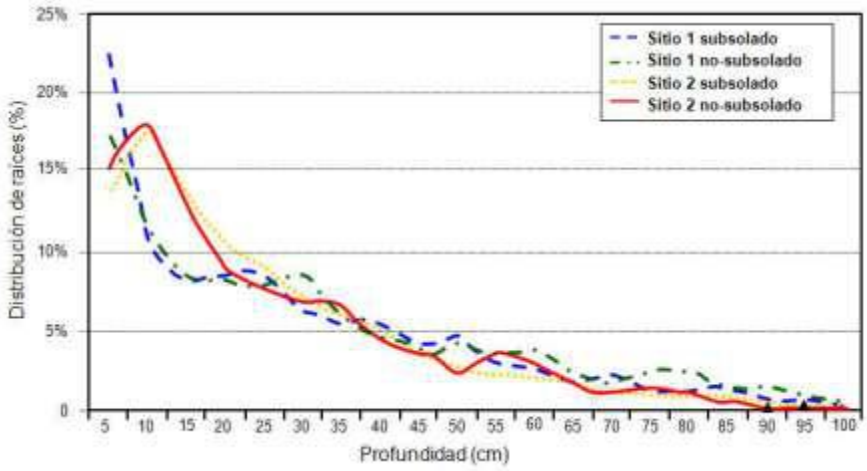


Fig. 9. Densidad de raíces totales en el perfil de suelo. Promedio entre fechas para los dos sitios de observación en dos tratamientos (subsolado y no-subsolado).

En el sitio uno con mejores condiciones de drenaje y no subsolado, se observó una mayor densidad de raíces gruesas en ambas profundidades del perfil (0-50 y 55-100 cm), mientras que las menores densidades correspondieron al sitio dos no subsolado (Fig. 10), $P<0.05\%$, DMS 5%.

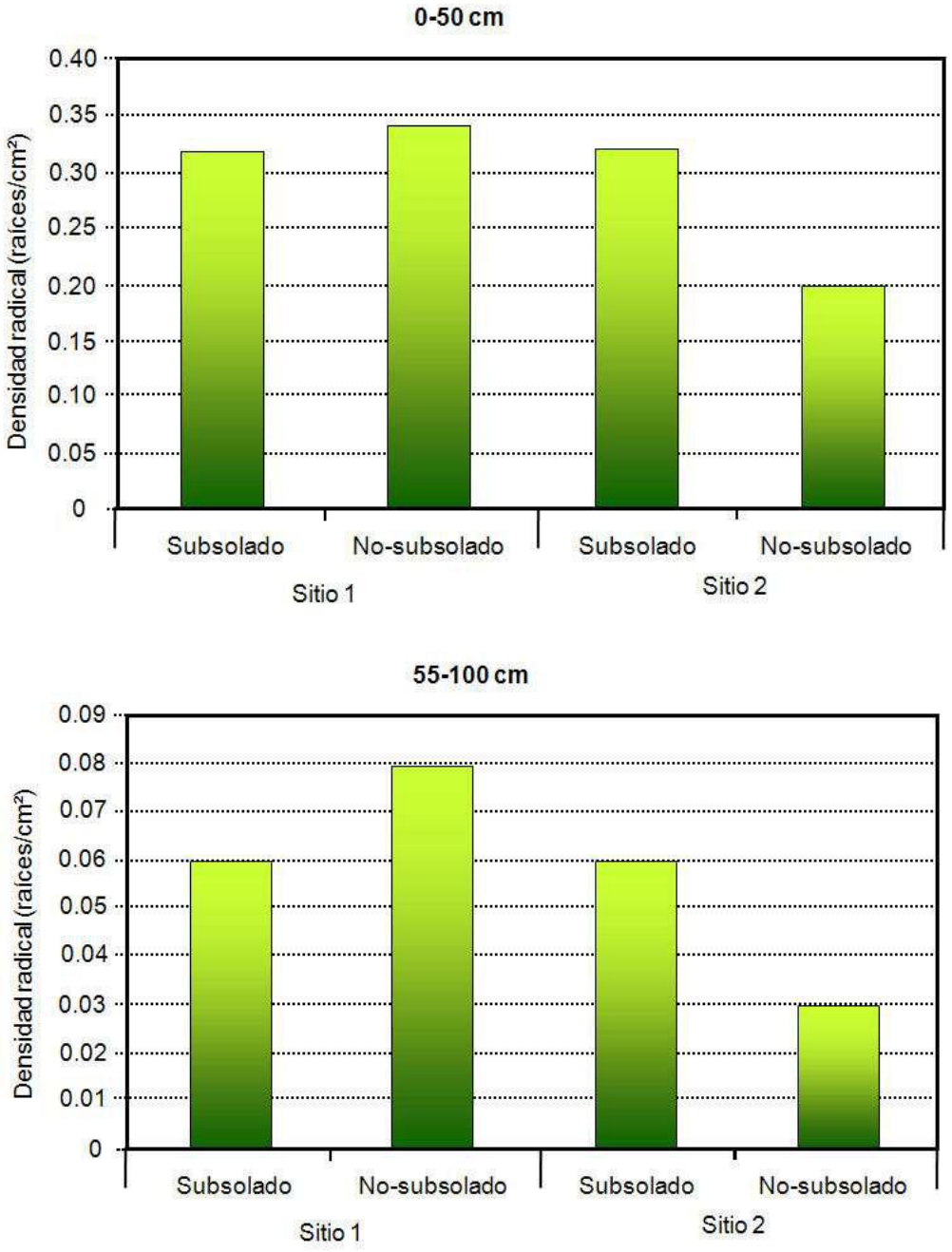


Fig. 10. Densidad promedio de raíces gruesas a dos profundidades (0-50 y 55-100 cm) en dos sitios (sitio dos con nivel freático fluctuante) y para dos métodos de preparación del suelo (subsolado y no-subsolado).

Para la variable densidad de raíces finas se observaron diferencias significativas entre sitios ($P<0.05\%$, DMS 5%), en ambas profundidades, donde el sitio uno (mejor aireado) fue mejor. La densidad de raíces finas por debajo de 55 cm de la superficie fue aproximadamente 4,6 veces menor en el sitio 1 y 11 veces menor en el peor drenado (Fig. 11). En el sitio 2 con limitaciones de drenaje y no subsolado, las raíces finas se confinaron en los primeros 50 cm.

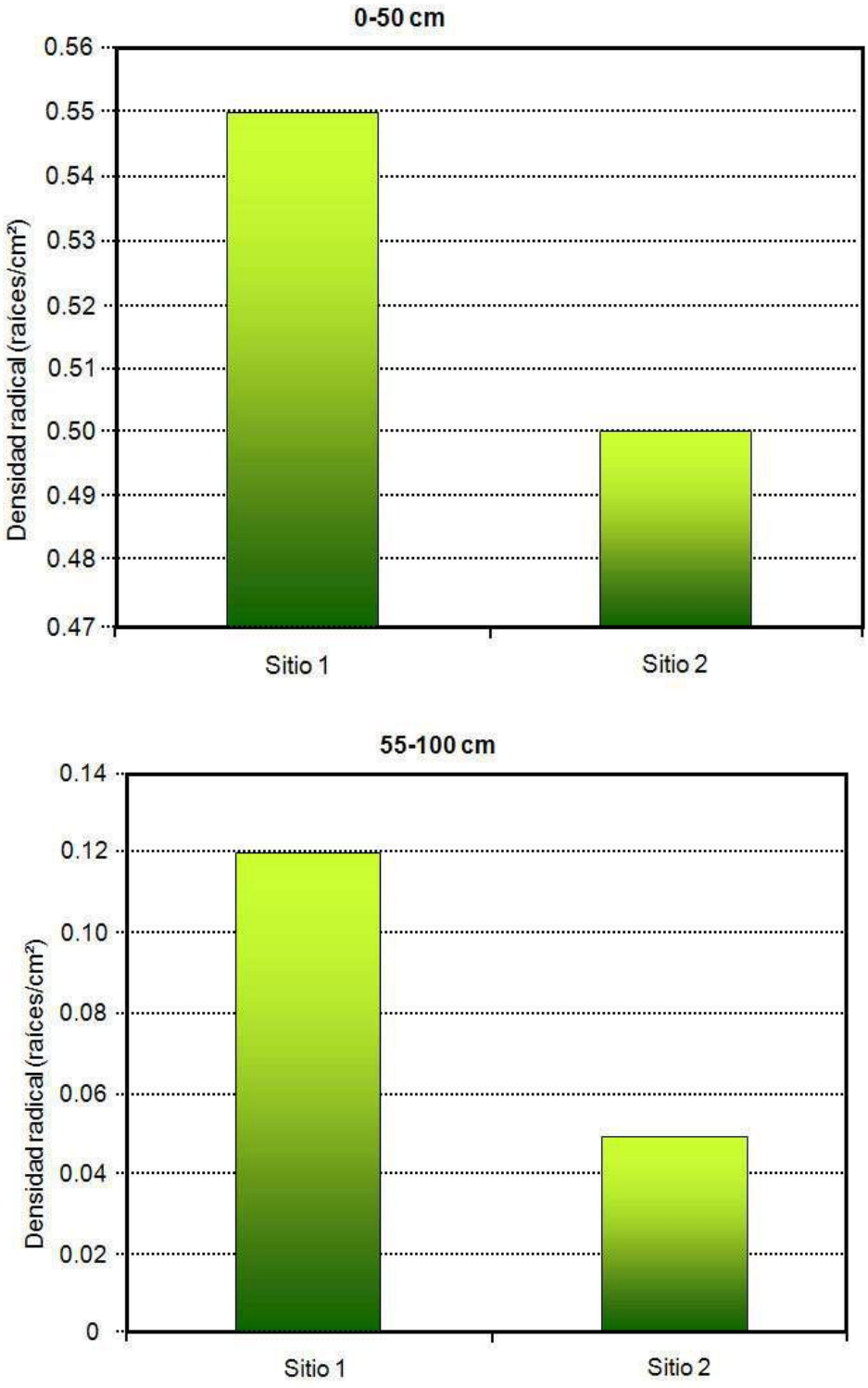


Fig. 11. Densidad promedio de raíces finas (raíces/cm²) en el perfil de suelo a dos profundidades (0 - 50 y 55 - 100 cm) en los dos sitios de muestreo. El sitio dos presentaba un nivel freático fluctuante por efecto de mareas.

Resistencia a la penetración y desarrollo del sistema radical

La penetrometría o uso de penetrómetros es uno de los métodos más utilizados para evaluar la presencia de capas compactadas en suelos agrícolas (De León et al. 1998, Rooney y Lowe 2000, Duiker 2002). Esta característica permite diagnosticar situaciones de compactación y la posterior utilización de métodos adecuados (profundidad de trabajo y tipo de equipo a usar) para solucionar el problema.

No se encontró interacción entre sitios y los métodos de preparación del suelo en cuanto a la variable resistencia a la penetración. En ambos sitios el subsolado disminuyó la resistencia a la penetración, encontrándose diferencias entre métodos de preparación del suelo (P=0.004, DMS 5%) (Fig. 12).

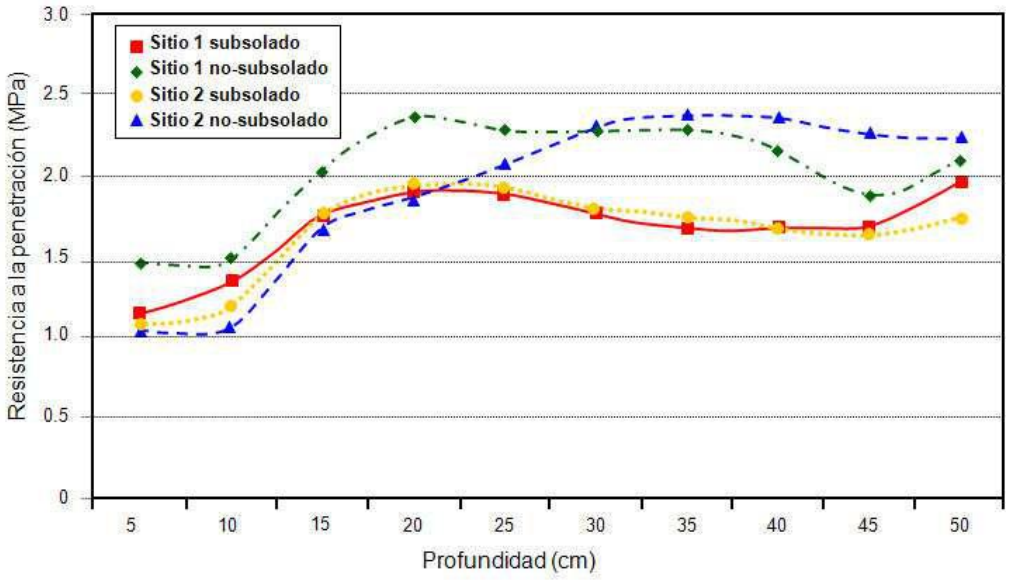


Fig. 12. Resistencia a la penetración en MPa para los primeros 50 cm de profundidad en el perfil en los dos sitios y para los dos métodos de preparación del suelo (subsolado y no-subsolado). El sitio two tenía menor aireación.

El desarrollo tanto del sistema radical grueso como del fino fue negativamente afectado cuando el valor de resistencia a la penetración fue mayor que 1.20 MPa. La probabilidad de encontrar algún tipo de raíces en suelos con valores superiores a 1.20 MPa fue menor de 5% y nula con valores iguales o mayores a 1.60 MPa. Por consiguiente, la aparición de PC se ve favorecida en sitios en donde el suelo presenta valores de resistencia a la penetración cercanos a 1.2 MPa en alguna parte del perfil, como consecuencia del confinamiento del sistema radical a un volumen determinado por la profundidad a la que se encuentre la capa compactada (Coder, 2000). En éste sentido, Acosta y Munevar (2002) relacionan mayores incidencias de PC con sitios con suelos compactados con valores de resistencia a la penetración mayores a 1.07 MPa.

Incidencia de PC y crecimiento radical de la palma

En la figura 13 se muestra la dinámica del sistema radical en cada fecha de evaluación tomando como base las raíces cuantificadas en la primera fecha de muestreo. Tanto para las raíces gruesas como para las finas es notorio el crecimiento sostenido en la cantidad de raíces durante las tres primeras fechas de muestreo. Sin embargo, en las palmas que se enfermaron, los crecimientos fueron más vigorosos pero cayeron fuertemente para la cuarta fecha de muestreo, justo cuando empezaron a mostrar los primeros síntomas aéreos de la enfermedad. En cambio las palmas que no se enfermaron, mantuvieron un crecimiento moderado durante las cuatro fechas de evaluación. Estos datos son coincidentes con observaciones realizadas en otros ensayos en donde las palmas más vigorosas son las que primero se enferman, mientras que palmas con tasa de desarrollo de la biomasa relativamente bajo o moderado presentan mayor tolerancia al complejo flecha seca.

Incidencia de PC y crecimiento aéreo de la palma

A los doce meses de sembradas las palmas, se observaron los primeros casos de PC en el sitio 1 (mejor drenaje), pero la enfermedad solo llegó a afectar 0.05% de las plantas a los dos años de edad en este sitio. Por el contrario, en el sitio 2 (con nivel freático fluctuante), la incidencia de PC a los 24 meses alcanzó 58%, y solo unas pocas palmas habían iniciado el proceso de recuperación. No se encontró interacción entre los sitios y el método de preparación del suelo (subsolado o no).

Durante el desarrollo del experimento, el nivel freático en el sitio con mejor drenaje se mantuvo a profundidades mayores de un metro. En el sitio 2, se combinaron los efectos negativos de una alta precipitación pluvial con el de las mareas, que ocasionaron el ascenso temporal del nivel freático a profundidades menores de 50 cm. Esto ocasionó que fuera necesario achicar el agua en las calicatas para la toma de datos durante el período lluvioso. La profundidad del nivel freático es uno de los factores que más limitan el desarrollo radical (Purvis 1956, Hartley 1977)

Otro factor que pudo afectar en forma adversa el desarrollo radical en el sitio 2 (menor aireación) fue el nutricional. Los resultados de los análisis químicos de suelos realizados en 1998 y 1999 reflejaron diferencias entre ambos sitios. Aunque la saturación con potasio era baja en general, fue menor en el sitio con mayor incidencia de PC (0.11 cmol(+)/l vs. 0.17 cmol(+)/l en el sitio 1). El nivel mínimo aceptable de K+ es de 0.2 cmol(+)/l). La saturación con potasio fue de 0.44% en el sitio 2 (mal drenado) y 0.67% en el sitio 2 (menor incidencia de PC). El nivel mínimo aceptable para esta variable es de 2.5%.

Contrariamente, la cantidad de Mg en el sitio mal drenado fue mayor, con relaciones Mg/K muy altas (77 en sitio 2 vs 27 en sitio 1). El valor aceptable para esta última variable está dentro del ámbito de 2.5 y 15.

Las medidas de crecimiento aéreo (área transversal del pecíolo y área foliar) fueron diferentes entre sitios y entre métodos de preparación del suelo. No obstante, no se encontró una interacción entre ambas variables para cantidad de racimos por palma (carga) y en otras

mediciones de crecimiento vegetativo. El sitio con mejores condiciones de suelo favoreció un mayor crecimiento aéreo y la carga de racimos fue también mayor (Cuadro 2).

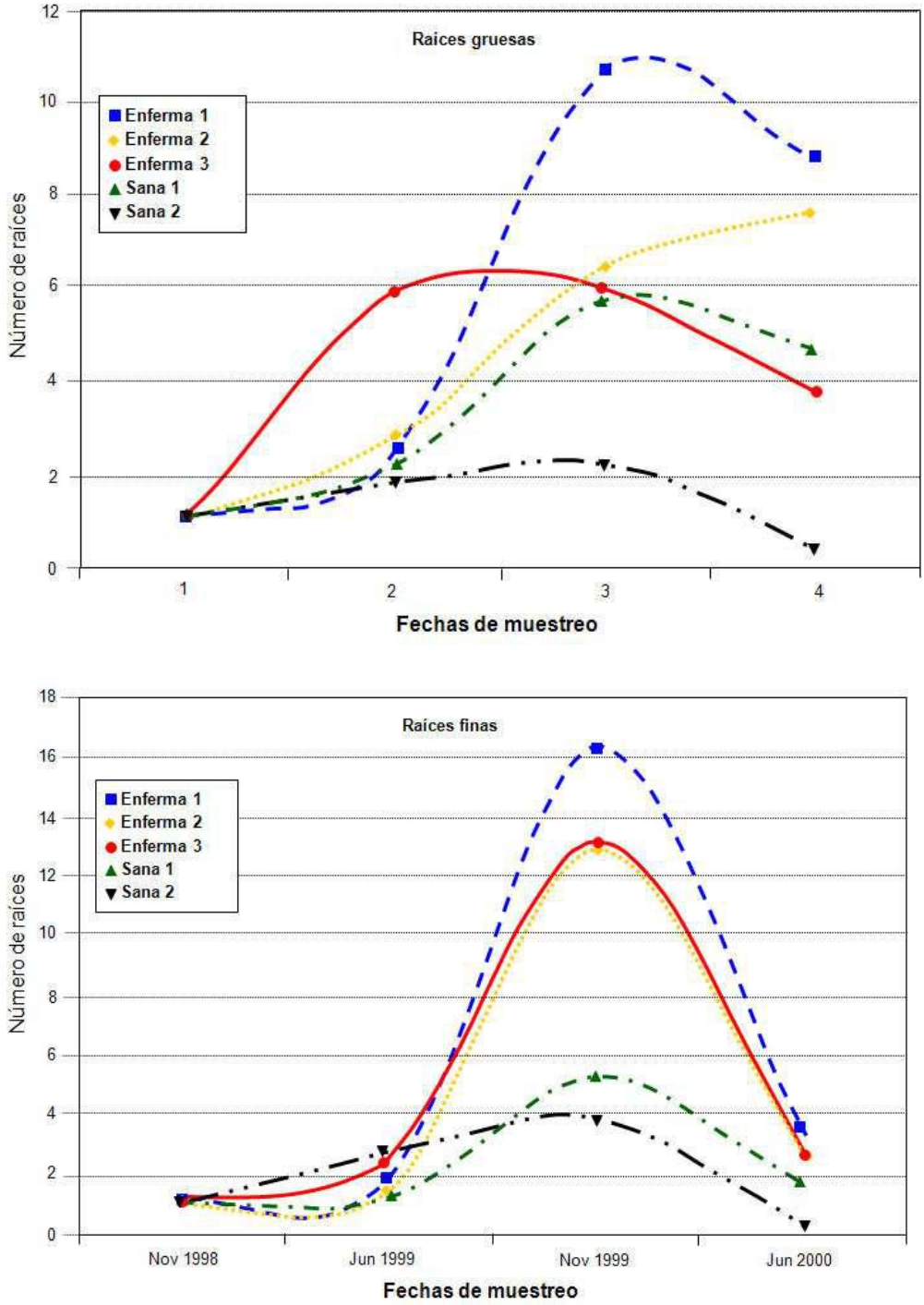


Fig. 13. Dinámica del sistema radical grueso y fino de palmas sanas y con flecha seca para cada fecha de evaluación, con relación a las raíces cuantificadas durante la primera fecha de muestreo.

Cuadro 2. Número de racimos /palma (carga), longitud del raquis (LR), área transversal del pecíolo (PxS) y área foliar (AF) en dos sitios con diferentes condiciones de drenaaje (sitio 2 con nivel freático fluctuante), subsolados o no subsolados

Lote	Método	Carga de racimos	LR (cm)	PxS (cm^2)	AF (m^2)
1	Subsolado	5.33 a	225	8.31 a	2.24 a
1	No subsolado	3.56 ab	216	8.54 a	2.33 a
2	Subsolado	2.61 bc	220	7.84 a	2.15 a
2	No subsolado	1.17 c	221	6.07 b	1.66 b

Letras diferentes en una misma columna denota diferencias estadísticas. P<0.05% DMS 5%

Conclusiones

La presencia de un nivel freático alto y fluctuante se asoció con una menor densidad de raíces finas y gruesas a través del perfil del suelo en palma joven. Una mayor resistencia a la penetración (compactación) en el caso de la parcela sin subsolar, también se consideró un impedimento para el desarrollo del sistema radical. Una fertilidad baja en el suelo (particularmente potasio y alta relación Mg/K) también se asoció con un menor desarrollo radical.

Las condiciones adversas anteriores también ocasionaron un menor desarrollo vegetativo y una menor carga inicial de racimos. Es aparente que en condiciones adversas al desarrollo radical, la planta intenta producir nuevas raíces con consecuencias negativas para sí misma; ya que ese sistema está expuesto al deterioro, por lo cual la planta debe reinvertir energía para producir más raíces. Esta situación puede conducir al debilitamiento de la planta y a una mayor susceptibilidad a la PC o cualquier otro problema.

Condiciones adversas al desarrollo radical están claramente asociadas con una mayor incidencia del trastorno de la flecha seca o pudrición del cogollo. Se concluye que existe evidencia de que la expresión fenológica de síntomas de PC parece estar influenciada por la conjunción de varios factores predisponentes (capas compactadas y nivel freático alto por ejemplo) y factores disparadores (nutricionales y déficit hídrico) que pueden desencadenar el desarrollo del complejo en diversos grados de incidencia y severidad.

El uso de 30 plantas por repetición fue suficiente para declarar diferencias al 5% para la variable densidad de raíces con el método de evaluación con el barreno holandés. La evaluación de raíces con el método de perfiles o ventanas de observación se presenta como una alternativa viable para estudiar el sistema radical en palma aceitera. No obstante, se recomienda acortar el tiempo entre evaluaciones, a menos de seis meses entre sí (según los objetivos), debido a la dinámica del sistema radical de la palma aceitera joven.

El desarrollo del sistema radical de la palma aceitera presentó un crecimiento en parches, especialmente el sistema radical fino. La presencia de horizontes o capas con valores de

resistencia a la penetración mayores a 1.2 MPa parece ser uno de los factores que más influye sobre el volumen de suelo potencialmente explorado por las raíces primarias y secundarias de la palma aceitera. El penetrómetro se presenta como una herramienta práctica para diagnosticar áreas con suelos con problemas de compactación.

Literatura

Acosta, A.; Munevar, F. 2003. Bud rot in oil palm plantations: link to soil physical properties and nutrient status. Better Crops International. 17(2): 22-25.

Agamuthu, P.; Broughton, W. J. 1986. Factors affecting the development of the rooting system in young oil palms (Elaeis guineensis Jacq.). Agriculture, Ecosystems and Environment 17: 173-179.

Albertazzi, H.; Bulgarelli, J.; Chinchilla, C. 2005. Eventos previos y contemporáneos a la aparición de los síntomas de la pudrición del cogollo en palma aceitera. ASD Oil Palm Papers, N° 28, 21-41.

Alvarado, A; Chinchilla, C; Bulgarelli, J; Sterling, F. 1997. Agronomic factors associated with common spear rot in oil palm. ASD Oil Palm Papers, 15: 8-28.

Alvarado, A.; Sterling, F. 1993. Evaluación del patrón de distribución del sistema radical de la palma aceitera (Elaeis guineensis Jacq.). Agronomía Costarricense 17(1): 41-48.

Arnone, J. A. 1997. Temporal responses of community fine roots populations to long term elevated atmospheric CO2 and soil nutrient patches in model tropical ecosystems. Acta Oecologica 18(3): 367-376.

Armas V, F.V.; Alves B, M.L.; Godoy J., G.; Berton, R.S. 2005. Lodo de esgoto e sistema radicular da pupunheira. Revista Brasileira do Ciencia du Solo. 29: 259-268.

Barrios, R. 1998. Evaluación de las propiedades hidráulicas de dos suelos irrigados cultivados con palma aceitera en el Estado de Monagas. Tesis de Maestría en Ciencias, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela.107 pp.

Bhöm, W. 1979. Methods of studying root systems. Springer-Verlag. Berlin. 190 p.

Chinchilla, C.; Durán, N. 1999. Nature and management of spear rot-like problems in oil palm: a case study in Costa Rica. Proc. of the 1999 PORIM International Palm Oil Congress - Emerging Technologies and Opportunities in the Next Millennium (Agriculture), Kuala Lumpur, Malaysia. 1-6 February 1999. p. 97-126.

Chinchilla C.; Durán, N. 1998. Manejo de problemas fitosanitarios en palma aceitera: una perspectiva agronómica. Palmas, Colombia. 19 (número especial): 242-256.

Chinchilla, C.; Escobar, R. 2004. The red ring and other diseases of the oil palm in Central and South America. In. Proc. of the International Conference on pests and diseases of importance to the oil palm industry. Kuala Lumpur, May 2004. p. 37-52.

Coder, K.D.; 2000. Soil compaction impacts on tree roots. University of Georgia, Warnell School of Forest Resources, Extension Publication FOR00-8.

Cristancho, J.; Munevar, F.; Acosta, A.; Santacruz, L.; Torres, M. 2007. Relación de las edáficas y el desarrollo del sistema radical de la palma de aceite (Elaeis guineensis Jacq.). Palmas 28 (1): 21-29.

De León, F.; Payan, F.; Sánchez, R.S. 1998. Localización de capas compactadas en el perfil de suelo mediante penetrometría. Terra 16(4): 303-307.

Duiker, S. 2002. Diagnosing soil compaction using a penetrometer (soil compaction tester). Pennsylvania State University, Department of Crop and Soil Sciences, Agronomy Facts 63, 4 pp.

Forde, S. C. M. 1972. Effect of dry season drought on uptake of radioactive phosphorus by surface roots of the oil palm (Elaeis guineensis Jacq.). Agronomy Journal 64: 622-623.

Grime, J. P.; Campbell, B. D.; Mackey, J. M. L. 1991. Root plasticity, nitrogen capture and competitive ability. En Plant root growth: an ecological perspective. Edited by Atkinson, D. Special Publication of the British Ecological Society #10. 381-397.

Hartley, C. W. S. 1977. La palma de aceite. México, Editorial Continental. 958 p.

Jourdan, C.; Rey, H. 1997. Modeling and simulation of the architecture and development of the oil palm (Elaeis guineensis Jacq.) root system. I. The Model. Plant and Soil. 190: 217-233.

Nuñez, R. 1989. Estudio de suelos en la División Quepos, CBCR. (Un enfoque de clasificación de suelos utilizando el sistema francés desarrollado por IRHO). Compañía Palma Tica S.A. 23 pp.

Purvis, C. 1956. The root system of the oil palm: its distribution, morphology and anatomy. Journal of the West African Institute for Oil Palm Research 1(4): 60-82.

Rapidel, B. 1998. Diseño de un sistema de muestreo de raíces en palma aceitera (Elaeis guineensis). Informe de consultaría, Compañía Palma Tica S.A. 35 pp.

Rooney, D.J. ;.; Lowe, B. 2000. A profile cone penetrometer for mapping soil horizons. Soil Science Society of America Journal 64 : 2136-2139

Ruer, P. 1967. Morphologie et anatomie du système radiculaire du palmier a huile. Olèagineux 22(10): 595-599.

Tan, K. S. 1979. Root development of oil palm on inland soils of west Malaysia. Section 6.5. In: Soil Physical properties and crop production in the tropics. págs. 363-374.

Tinker, P. B. 1976. Soil requirements of the oil palm. In Developments in Crop Science (1): Oil Palm Research. Eds. R. H. V. Corley, J. J. Hardon, B. J. Wood. Editorial Elsevier. Amsterdam, Holland, Chapter 13. P. 165-181.

Van Noorwijk, M.; Laeson, G.; Soumáre, A.; Groot, J. J. R.; Hairiah, K. 1996. Root distribution of trees and crops: competition and/or complementarity. In: Tree-Crop Interaction: A Physiological Approach. Edited by Ong, C. K. and Huxley, P. Editorial CAB International. Oxford, England, p. 319-364.

Annex 1. Guía de salud de las raíces (raíz corchosa) en palma aceitera

Escala	Grado	Escala
	1	
	2	
	3	
	4	