

**Evaluación de terapias para la recuperación de palmas aceiteras (*Elaeis guineensis* Jacq.) afectadas por la pudrición del cogollo (PC)**

**Jeremy Roberto Henry Bejarano**

**TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO  
DE LICENCIADO EN INGENIERÍA AGRONÓMICA  
CON ÉNFASIS EN FITOTECNIA**

**ESCUELA DE AGRONOMÍA  
FACULTAD DE CIENCIAS AGROALIMENTARIAS  
UNIVERSIDAD DE COSTA RICA**

**2015**

Evaluación de terapias para la recuperación de palmas aceiteras (*Elaeis guineensis* Jacq.)  
afectadas por la pudrición del cogollo (PC)

Jeremy Roberto Henry Bejarano

TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO DE LICENCIADO EN INGENIERÍA  
AGRONÓMICA CON ÉNFASIS EN FITOTECNIA

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Marco Vinicio Gutiérrez Soto

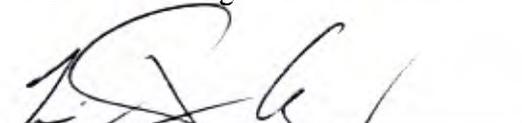
DIRECTOR DE TESIS

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Carlos Manuel Chinchilla

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

  
\_\_\_\_\_  
M.Sc. Rafael Ángel Mata Chinchilla

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Luis Felipe Arauz Cavallini

MIEMBRO DEL TRIBUNAL

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Eric Guevara Berger

DIRECTOR DE LA ESCUELA

  
\_\_\_\_\_  
Jeremy Roberto Henry Bejarano

SUSTENTANTE

## **DEDICATORIA**

A mi hija Zara, quien pese a su curiosidad infantil, me regaló parte de su tiempo para desarrollar este trabajo y a mi esposa Ana, que siempre me da su apoyo incondicional.

A mi madre, quien ha tenido más clara la importancia y la necesidad de mi desarrollo personal y profesional, y a mi padre, a quien le debo la lección aprendida sobre vencer las adversidades y mantenerse firme para alcanzar las metas propuestas.

A mi hermano Jonathan, hombre que me inspira con su vida a buscar siempre lo mejor, y Anthony, del que siempre espero un abrazo sincero y una sonrisa franca, que me recuerda que superarse es más gratificante si se cuenta con alguien para compartir esa alegría.

## AGRADECIMIENTOS

A la compañía ASD Costa Rica, por el apoyo proporcionado en esta investigación.

Al director de esta tesis, Dr. Marco V. Gutiérrez, por el compromiso mostrado y la dedicación exhaustiva durante la realización de este estudio, y por su capacidad de transmitir con entusiasmo su profundo conocimiento de la fisiología vegetal.

Al equipo de trabajo del proyecto de Ecofisiología de la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno (UCR): Andrés Castillo y Max Prigge, quienes colaboraron de manera entusiasta con las mediciones de fotosíntesis. A José Araya quien brindó asistencia técnica en el uso de los instrumentos para las mediciones fisiológicas y al Ing. Fabio Blanco por su ayuda con el análisis estadístico.

Al colega Joaquín Torres, quien a partir de su experiencia en materia de suelos y la fisiología de la PC, fue capaz de generar recomendaciones muy acertadas durante el desarrollo de esta investigación.

A los colegas: Ricardo Escobar, Francisco Peralta, Álvaro Carmona, Carlos Chinchilla, Amancio Alvarado, y Juan Carlos Miranda, por el interés mostrado, apoyo en las labores de campo y recomendaciones técnicas que facilitaron la realización del trabajo.

A Andrey Serrano, Cristian Loaiza y William Ávila, por el excelente aporte brindado durante la aplicación de las terapias de recuperación y las evaluaciones de campo.

A Alexander Palacios y Jesús Rodríguez por su colaboración con el manejo de la información.

## ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>VII</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS .....</b>	<b>IX</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>X</b>
<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>11</b>
<b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>14</b>
<b>OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>18</b>
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>18</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>19</b>
<b>Localización del estudio y material vegetal.....</b>	<b>19</b>
<b>Ambiente aéreo .....</b>	<b>21</b>
<b>Terapias de recuperación.....</b>	<b>21</b>
<b>Caracterización geomorfológica, física, química y microbiológica del suelo.....</b>	<b>22</b>
Análisis físico .....	22
Análisis químico .....	24
Análisis microbiológico.....	24
<b>Variables morfológicas, de crecimiento y producción .....</b>	<b>24</b>
Altura del tronco.....	24
Número de hojas.....	25
Longitud del raquis.....	25
Sección transversal del peciolo (PxS) .....	25
Densidad de raíces .....	25
Severidad de la PC.....	25
Producción de racimos .....	26
Características del racimo y contenido de aceite.....	26
<b>Variables fisiológicas .....</b>	<b>26</b>
Potencial hídrico de las hojas .....	26
Conductancia estomática, temperatura y transpiración .....	26
Fotosíntesis .....	27
<b>Nutrientes en las hojas.....</b>	<b>27</b>
<b>Análisis e interpretación de los datos experimentales.....</b>	<b>27</b>
<b>RESULTADOS.....</b>	<b>29</b>
<b>Condiciones climáticas del sitio.....</b>	<b>29</b>
<b>Geomorfología y física del suelo.....</b>	<b>31</b>
<b>Distribución espacial de la PC en función de la humedad volumétrica del suelo....</b>	<b>35</b>
<b>Propiedades químicas del suelo.....</b>	<b>37</b>

<b>Propiedades microbiológicas del suelo .....</b>	<b>38</b>
<b>Comportamiento de la PC en función de las terapias de recuperación.....</b>	<b>40</b>
<b>Densidad de raíces .....</b>	<b>42</b>
<b>Crecimiento .....</b>	<b>44</b>
Altura del tronco.....	44
Número de hojas y sección transversal del peciolo (PxS).....	44
Longitud del raquis.....	44
<b>Variables fisiológicas .....</b>	<b>46</b>
Potencial hídrico.....	46
Conductancia estomática, transpiración y temperatura de las hojas .....	48
Fotosíntesis .....	50
<b>Nutrientes en las hojas.....</b>	<b>52</b>
<b>Producción de fruta y características del racimo .....</b>	<b>53</b>
<b>DISCUSIÓN .....</b>	<b>54</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>66</b>
<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>68</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Precipitación, radiación solar total, evaporación potencial ( $ET_0$ ), temperatura y humedad relativa del aire medidos diariamente entre noviembre de 2012 y junio de 2014. Información obtenida de una estación automática Watch Dog..... 30
- Figura 2. A:** Variaciones en el relieve del sitio. **B:** distribución espacial de las unidades edáficas. Los diagramas fueron generados a partir de 80 palmas seleccionadas en el estudio y la descripción de dos calicatas. La interpolación se realizó con el método Kriging; utilizando el programa Surfer 8. .... 32
- Figura 3.** Profundidad, nomenclatura de los horizontes y clasificación taxonómica de las dos unidades edáficas presentes en el área donde se implementaron las terapias de recuperación en palmas del clon Tornado. Ambas unidades presentan limitaciones debidas al mal drenaje superficial (horizonte Ap). Para la clasificación se utilizó la clave de la taxonomía de suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA)..... 33
- Figura 4.** Avance del trastorno de la PC a través de tiempo (promedio de tres meses) en relación con los cambios en la humedad volumétrica del suelo (HV, %) entre 0 y 80 cm de profundidad, en el área donde se implementaron las terapias de recuperación en palmas del clon Tornado. Los diagramas de humedad del suelo se realizaron a partir de mediciones a través del tiempo en 20 puntos de muestreo y el grado de severidad en 80 palmas. Las interpolaciones se realizaron con el método Kriging, utilizando el programa Surfer 8. .... 36
- Figura 5.** Abundancia expresada en pg ADN/ml de suelo, de los principales grupos filogenéticos y géneros presentes en la rizosfera 12 meses después de la aplicación de las terapias de recuperación. A: Testigo absoluto y B: Acondicionamiento del suelo. Los resultados corresponden a la estación lluviosa de 2013 (noviembre), a partir de una muestra compuesta de cinco palmas de cada tratamiento; las muestras se tomaron en los primeros 10 cm de profundidad del suelo a 1 metro de la base del tronco. .... 39
- Figura 6.** Avance del trastorno de la PC a través del tiempo en función de la severidad inicial de PC y el tratamiento de recuperación implementado en palmas del clon Tornado. Las curvas de severidad se construyeron a partir de mediciones mensuales en 10 palmas por tratamiento. Las categorías PC 0 = palma sana, PC 1 = PC inicial y PC 2 = PC leve, corresponden a la severidad inicial ..... 41
- Figura 7.** Densidad de raíces ( $cm/cm^3$ ) en función de la severidad de PC y el tratamiento de recuperación. Las muestras fueron tomadas de 0 a 30 cm de profundidad y a 0,5 y 1 m de distancia en la rodaja de las palmas. En el análisis de varianza, la significancia de la diferencia entre las severidades de PC se verificó mediante el método de la diferencia mínima significativa (dms), mientras que los tratamientos T3 y T4 se compararon con el testigo (T5) mediante el test de Dunnet a un nivel de significancia de  $P < 0,01$ . Los resultados son las medias de 7 muestras por tratamiento por fecha de evaluación..... 43

- Figura 8.** Sección transversal del peciolo (PxS) de la hoja No. 9, longitud de raquis de la hoja No. 9, número total de hojas y altura del tronco a través del tiempo en función de la severidad de PC y el tratamiento de recuperación implementado en palmas del clon Tornado. En el análisis de varianza (evaluación de marzo de 2014), la significancia de la diferencia entre las severidades de PC se verificó mediante el método de la diferencia mínima significativa (dms), mientras que los tratamientos T3 y T4 se compararon con el testigo (T5) mediante la prueba de Dunnet a un nivel de significancia de  $P < 0,05$ . Los resultados son las medias de 10 repeticiones por tratamiento por fecha de evaluación. .... 45
- Figura 9.** Potencial hídrico de las hojas ( $\Psi_H$ ) No. 1 y 9 en las tres categorías de severidad de PC evaluadas en palmas del clon Tornado, en la mañana (5:00-6:00 am) y la tarde (11:00-1:00 pm) de las estaciones: seca 2013 (febrero-marzo), lluviosa del año 2013 (setiembre-octubre) y seca del año 2014 (marzo) en el Pacífico sur de Costa Rica. La comparación múltiple de todos los pares de medias en el análisis de la varianza, fue realizada utilizando la prueba de DGC. Los resultados son las medias de 250 muestras por cada estación, donde letras iguales denotan diferencias no significativas con un nivel de significancia de  $P < 0,05$ . .... 47
- Figura 10.** Conductancia estomática, transpiración y temperatura de la hojas No. 1, 9 y 17 en las tres categorías de severidad de PC evaluadas en palmas del clon Tornado, en las estaciones: seca 2013 (febrero-marzo), lluviosa del año 2013 (setiembre-octubre) y seca del año 2014 (marzo) en el Pacífico sur de Costa Rica. La comparación múltiple de todos los pares de medias, en el análisis de la varianza, fue realizada utilizando la prueba de DGC. Los resultados son las medias de 70 muestras por cada estación, donde letras iguales denotan diferencias no significativas con un nivel de significancia de  $P < 0,05$ . .... 49
- Figura 11.** Radiación fotosintéticamente activa (RFA), fotosíntesis neta (A), conductancia estomática ( $g_s$ ) y transpiración (E) de la hoja No. 9 en las tres categorías de severidad de PC evaluadas en palmas del clon Tornado, en las estaciones: lluviosa 2013 (setiembre) y seca 2014 (febrero) en el Pacífico sur de Costa Rica. La comparación múltiple de todos los pares de medias, en el análisis de la varianza, fue realizada utilizando la prueba de DGC. Los resultados son las medias de 24 muestras por hora por severidad de PC por cada estación, donde letras iguales denotan diferencias no significativas con un nivel de significancia de  $P < 0,05$ . .... 51
- Figura 12.** La partición de asimilados expresados como los recursos limitados disponibles para el crecimiento de la palma aceitera entre las actividades fisiológicas más importantes (Autoría Gutiérrez, 2014) ..... 63

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Descripción de los estados de desarrollo de la PC considerados en el estudio. .	20
<b>Cuadro 2.</b> Matriz que muestra las combinaciones de las tres severidades de PC en palmas aceiteras del clon Tornado y las cuatro terapias de recuperación aplicadas. ....	21
<b>Cuadro 3.</b> Descripción de las terapias para la recuperación de palmas aceiteras afectadas por la PC.....	23
<b>Cuadro 4.</b> Propiedades físicas de las dos unidades edáficas y del horizonte superficial Ap correspondientes al área donde se implementaron las terapias de recuperación en palmas del clon Tornado. Los valores son promedios ponderados tomando en cuenta la profundidad de los horizontes en cada uno de los perfiles. Los datos fueron tomados en noviembre de 2012. ....	34
<b>Cuadro 5.</b> Macro nutrientes (Ca, Mg, K, P y N), CICE, pH, acidez, saturación de acidez y la relación C/N del suelo donde se aplicaron las terapias de recuperación implementadas en palmas del clon Tornado. Los resultados provienen de muestras compuestas de 10 palmas por terapia. Los parámetros considerados deseables para la palma aceitera están sombreados con gris. En el proceso de análisis se utilizó la solución extractora Melich 3.....	37
<b>Cuadro 6.</b> Micro nutrientes (Fe, Mn, Zn y Cu), y relaciones catiónicas (Ca/Mg, Ca/K, Mg/K y (Ca+Mg)/K), del suelo donde se aplicaron las terapias de recuperación implementadas en palmas del clon Tornado. Los parámetros considerados deseables para la palma aceitera están sombreados con gris. En el proceso de análisis se utilizó la solución extractora Melich 3.....	38
<b>Cuadro 7.</b> Contenido de nutrientes en la hoja No. 9 de palmas del clon Tornado de acuerdo con la severidad inicial de PC (noviembre de 2012) y el tratamiento de recuperación implementado en la estación lluviosa de 2014 (mayo). Cada valor es el promedio del análisis de folíolos basales, mediales y distales tomados de forma compuesta en cinco palmas de cada tratamiento.....	52
<b>Cuadro 8.</b> Rendimiento expresado en términos de la producción de fruta fresca y características de la composición del racimo en función de la severidad inicial de PC (noviembre de 2012) y el tratamiento de recuperación implementado en palmas del clon Tornado. Los resultados son las medias de 10 muestras por tratamiento, donde se realizó la comparación de medias entre los tratamientos T1 y T2 y T4 y T5 con la prueba de $t$ , a un nivel de significancia de $P < 0,05$ .....	53
<b>Cuadro 9.</b> Descripción de los síntomas asociados a la PC en el clon Tornado.....	57

## RESUMEN

La "Flecha Seca" o PC (pudrición del cogollo) es un trastorno que afecta el desarrollo, la fisiología y el rendimiento de la palma aceitera. En un lote comercial de palmas del clon Tornado de 30 meses de edad, ubicado en el Pacífico sur de Costa Rica, los primeros casos de PC se presentaron a finales de la estación lluviosa de 2012 (precipitación mensual promedio de 390 mm), periodo en que la humedad volumétrica entre 0-80 cm de profundidad del suelo superó el 40%. En el sitio se identificaron dos unidades edáficas: Coarse, Aquic Eutrudept y Medial, Aquic Eutrudept. Ambas unidades son de alto potencial productivo, no obstante, presentaron un drenaje limitado entre 0-30 cm de la superficie del suelo, donde la densidad aparente fue alta, la conductividad hidráulica baja, los espacios aéreos escasos y el relieve irregular. Periodos prolongados de alta precipitación y de elevada humedad volumétrica en el horizonte superficial del suelo provocaron la muerte de las raíces, afectando la absorción de nutrimentos y las relaciones hídricas. Lo anterior generó desbalances nutricionales y fisiológicos en la copa que se manifestaron en los síntomas clásicos de la PC: amarillamiento y secamiento de los folíolos localizados en la base de las hojas nuevas, pudrición/secamiento de las bases peciolares y la pérdida de la turgencia de los racimos. En noviembre de 2012 se aplicaron diferentes tratamientos para la recuperación de PC, las palmas del clon Tornado se recuperaron de los síntomas iniciales y leves de PC después de 18 meses. La recuperación del sistema radical se logró a través del mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo; con la cirugía de los tejidos enfermos de las bases peciolares se extendió la longevidad de las hojas y la ablación de las estructuras reproductivas mejoró el balance energético. Con la aplicación de estas terapias de recuperación, el contenido de nutrimentos en las hojas (N, Fe, S y K), la densidad de raíces, la altura del tronco, el potencial hídrico, la conductancia estomática, la fotosíntesis, la producción de fruta fresca y la acumulación de aceite en el racimo, aumentaron significativamente con respecto al testigo ( $P < 0,05$ ). Es necesario evaluar la aplicación de las terapias de recuperación en palmas de diferentes edades, antes de que estas puedan ser utilizadas a una mayor escala. En conjunto con las terapias de recuperación aplicadas en este estudio, parte de la clave para la recuperación de la PC está en hacer una detección temprana de los síntomas de este trastorno morfo-fisiológico.

**Palabras clave:** *Elaeis guineensis*, PC, trastorno morfo-fisiológico, organismos oportunistas, humedad volumétrica del suelo, terapias de recuperación, densidad de raíces, relaciones hídricas, conductancia estomática, fotosíntesis, rendimiento, contenido de aceite.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad el aceite de la palma aceitera es la principal fuente de aceite vegetal en el mundo, y corresponde a la tercera parte del aceite comercializado mundialmente; anualmente se producen 50 millones de toneladas de aceite y se espera que en los próximos 20 años aumente a 75 millones de toneladas de aceite por año. En términos de producción de aceite por hectárea, la palma aceitera es el cultivo más rentable entre los cultivos oleaginosos, y al mismo tiempo, el más exigente desde el punto de vista fisiológico, debido al alto costo energético involucrado en la biosíntesis de aceites y de carotenoides (Corley y Tinker, 2003; Tranbarger et al. 2011).

En Costa Rica existen más 60,000 ha del cultivo de la palma aceitera, principalmente en las zonas del Pacífico central y sur. Aproximadamente la mitad del área pertenece a pequeños productores independientes o agrupados en cooperativas, mientras que el resto pertenece al sector privado. Se estima que al menos 1,800 familias dependen directamente de esta actividad (CANAPALMA, 2011), lo que convierte a la palma aceitera un cultivo socialmente importante.

El mayor rendimiento de la palma aceitera se obtiene en regiones con condiciones climáticas en las que la precipitación anual es  $\geq 2000$  mm, sin una estación seca definida y preferiblemente con al menos 100 mm de precipitación mensual, siendo la temperatura media máxima de 33 C y la temperatura media mínima de 22 C (Corley y Tinker, 2003; Henson y Harun, 2005). Por el contrario, las precipitaciones superiores a 400 mm/mes resultan perjudiciales para desempeño del cultivo (Durán y Ortiz, 1995).

La “Flecha Seca” o Pudrición del Cogollo (PC) como se le conoce en Suramérica, es un trastorno que afecta el desarrollo, la fisiología y el rendimiento de la palma aceitera, que puede incluso causar la muerte de las palmas. En Costa Rica se ha determinado que las palmas aceiteras que sufren de PC presentan una reducción significativa del sistema radical, especialmente de las raíces finas, a causa del exceso de agua que provoca la deficiencia de oxígeno en el suelo, lo que genera la alteración de las relaciones hídricas en la planta, disminuyendo la conductancia estomática, el crecimiento y la ocurrencia de desequilibrios nutricionales (Torres, 2013).

La PC y otros trastornos de sintomatología similar han sido reportados en India, Tailandia, El Congo y Nigeria, entre otros. En América tropical se ha presentado desde que se establecieron las primeras plantaciones de palma aceitera en la década de los 60 en Colombia (Chinchilla, 2008).

Esta enfermedad ha causado inmensas pérdidas económicas e impactos sociales muy importantes, particularmente en varios países de Suramérica. El caso más reciente ocurrió en la región de Tumaco, Colombia, en donde se atribuye a la PC la pérdida de 35,000 has del cultivo de palma aceitera en un periodo de 10 años (CENIPALMA, 2011). En el caso de Costa Rica, la PC se extendió en los años 90 en el Pacífico central, donde afectó cientos de hectáreas del cultivo, pero no ocasionó la muerte de las palmas, en parte gracias a que se realizaron labores agronómicas para mitigar su impacto, tales como las mejoras en la red de canales de drenaje y la corrección de los desbalances de potasio en el suelo (Chinchilla, 2010).

El trastorno de la PC se inicia con la clorosis de los folíolos localizados en la base de las hojas nuevas. En estados más avanzados de la PC, los folíolos se secan y en las hojas jóvenes sin abrir (flechas) se desarrollan lesiones discretas oscuras, especialmente cerca de la base del cogollo que pueden provocar pudriciones o secamientos, los cuales en casos más severos penetran profundamente en la región del meristemo, provocando la muerte de la palma (Albertazzi et al. 2005).

La condición de cultivo perenne de la palma aceitera provoca que su extenso sistema radical permanezca expuesto a las alteraciones del suelo y a las consecuencias de diversos fenómenos atmosféricos que afectan la oxigenación del suelo y otras propiedades físicas, químicas y microbiológicas esenciales para la funcionalidad de los sistemas radicales. Generalmente, las palmas presentan síntomas de PC en suelos con una baja proporción de espacios aéreos, con desequilibrios de bases, principalmente K, Ca y Mg, y biomasa microbiana empobrecida (Durán y Ortiz, 1995; Torres, 2013).

Algunos investigadores señalan a algunos patógenos como *Phytophthora* sp. y *Ceratocystis* sp. como los posibles responsables de las lesiones iniciales de la PC (Drenth, 2012; Guest, 2012; Sarria, 2008). Sin embargo, no se ha demostrado que estos hongos sean responsables de todos los síntomas, y no se han aplicado los postulados de Köch ni pruebas de patogenicidad apropiadas (Torres et al. 2010; Suwandi y Kondo 2012). El papel de los numerosos organismos asociados a los síntomas de la PC parece ser más bien el de oportunistas, atacando las palmas que han sufrido algún tipo de estrés sostenido por algún tiempo y predisuestas a la infección (Albertazzi, 2008).

Los esfuerzos de investigación en la PC se han enfocado en describir la sintomatología del trastorno y (Albertazzi, 2008) y en la implementación de alternativas de manejo agronómico convencional que permitan la convivencia con el problema, por ejemplo, la corrección de desbalances nutricionales y mejoras de la aeración del suelo (Chinchilla y Durán, 1998). Sin embargo, el manejo futuro del desorden implica realizar una investigación básica para comprender las causas del trastorno.

Torres (2013) y Torres et al (2014) realizaron un estudio científico incorporando mediciones a lo largo del continuo suelo-planta-atmósfera, y encontraron que la PC es un trastorno complejo que tiene su origen en diferentes problemas edáficos como la anaerobiosis en suelos marginales, que afectan la salud y el funcionamiento de las raíces y se extiende a todos los órganos aéreos de la palma aceitera; los hallazgos de estos trabajos constituyen el fundamento de las terapias examinadas en esta tesis, en la que se propone la evaluación de terapias agronómicas para la recuperación integral tanto del sistema radical como el sistema vegetativo de la copa por igual.

## ANTECEDENTES

El trastorno conocido como pudrición del cogollo o PC se manifiesta inicialmente como la clorosis de los folíolos basales de las hojas más jóvenes, seguida por el secamiento y pudrición de las hojas sin abrir o flechas. La clorosis de las hojas ya abiertas también degenera en secamientos y pudriciones. En algunos sitios y plantas en particular, las pudriciones avanzan dentro del cogollo de la palma y si alcanzan el meristemo apical, causan la muerte. No obstante, es común que las plantas se recuperen, lo cual puede tomar dos o más años, aunque el proceso puede acortarse sensiblemente mejorando las prácticas agronómicas (Albertazzi, 2008), o retrasando la aparición de la PC en el campo de manera que su incidencia inicial se de en plantaciones de mayor edad.

Algunas condiciones que predisponen la palma aceitera a la PC han sido parcialmente identificadas. Se mencionan los desequilibrios nutricionales y el déficit hídrico (Albertazzi, 2008; Chinchilla, 2010). Torres (2013) asoció la ocurrencia de la PC con la degradación de las propiedades físicas de suelos marginales, que provocan la muerte de las raíces a causa de la falta de oxígeno durante periodos de precipitación excesiva. La clorosis y secamientos en las hojas jóvenes y otros síntomas observados en palmas afectadas por la PC podrían estar asociadas con la mala aeración del suelo, el bajo contenido o desequilibrios entre elementos como el hierro, el manganeso, y el zinc, así como con desequilibrios entre las bases (K, Ca y Mg), y eventos que alteran el balance hídrico de las plantas, como periodos de muy altas o escasa precipitación, todo lo cual afecta la salud del sistema radical y la capacidad fotosintética de las hojas (Torres, 2013).

La reducción en la tasa de incremento de altura del tronco y en la tasa de emisión foliar han sido utilizadas para diagnosticar el deterioro de palmas jóvenes bajo estrés (Alvarado y Sterling, 1998; Umaña y Chinchilla, 1991). Albertazzi (2008) indica que la sección transversal del peciolo (índice PxS), la longitud del raquis, la calidad de las raíces, la producción de racimos, el contenido de aceite, las variaciones de los azúcares solubles totales y el contenido de nutrientes de las hojas más jóvenes completamente expandidas (hoja No. 9) sufren cambios ante condiciones de estrés, ya sean previos o contemporáneos a la aparición de los primeros síntomas de la PC. Por lo tanto, el estudio de las variables morfológicas y fisiológicas, el conocimiento del estado nutricional de las hojas y de las

condiciones edáficas y climáticas puede ayudar a entender la relación entre la incidencia de PC (Torres, 2013) y el desempeño fisiológico de la palma aceitera en el campo (Henson y Harun, 2005; Legros et al. 2009a; Milaet-Serra et al. 2006).

La palma aceitera es una planta C3 heliófita con alta eficiencia en la utilización de la radiación solar; en condiciones ambientales favorables presenta un crecimiento vegetativo vigoroso que le permite capturar hasta el 96% de la radiación solar fotosintéticamente activa a valores óptimos de IAF (4-7), logrando bajo plena radiación solar una tasa fotosintética máxima de hasta  $25 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Corley y Tinker, 2003; Basri et al. 2004; Legros et al. 2009a; Wood y Corley, 1991). La parte aérea de la palma aceitera está conformada por un único tallo mono-axial que porta un solo meristemo apical. En condiciones climáticas favorables, el meristemo está continuamente activo, produciendo una nueva hoja aproximadamente cada dos semanas en palmas adultas (Corley y Tinker, 2003).

El sistema radical de la palma aceitera es extenso, succulento, fibroso, y relativamente superficial, con la mayor cantidad de raíces activas localizadas en los primeros 45 cm del perfil del suelo; en suelos con buenas condiciones de drenaje, las raíces pueden extenderse hasta los seis metros de profundidad (Jourdan y Rey, 1997).

La arquitectura del sistema radical comprende cuatro categorías morfo-fisiológicas identificadas según su posición, crecimiento y ramificación. Las raíces primarias (I) y secundarias (II) son emitidas a partir de la base de las palmas, y en plantas muy jóvenes, desde las bases peciolares de las hojas a nivel del suelo, las cuales proveen el anclaje y el transporte de agua y solutos. Desde las raíces secundarias se extienden las terciarias (III) y cuaternarias (IV) que son raíces más finas encargadas de la mayor absorción de agua y nutrimentos; algunas de estas raíces exhiben geotropismo negativo (crecen hacia arriba) y responden con rapidez y efectividad a enmiendas aplicadas en la superficie del suelo. Las raíces I y II se consideran pioneras por preceder a las raíces absorbentes, mientras que las raíces III y IV son de tipo colonizador, y se consideran las más importantes desde el punto de vista de la absorción de agua, nutrientes y en el establecimiento de relaciones microbianas (Jourdan y Rey, 1997; Gutiérrez et al. 2014).

La partición de los productos de la fotosíntesis ocurre entre los órganos en crecimiento que funcionan como sumideros activos (Corley y Tinker, 2003). Los principales sumideros de la palma aceitera son el crecimiento vegetativo: el crecimiento del tronco y el almacenamiento de reservas, la producción de raíces, el desarrollo reproductivo, y por último, la producción de las hojas. El resto de la energía producida se utiliza en el mantenimiento de procesos metabólicos y hasta 20% de la materia seca es almacenada en forma de carbohidratos no estructurales en el tronco (Milaet-Serra et al. 2006; Legros et al. 2009b). Esta jerarquía en la importancia relativa de los sumideros condiciona la efectividad de las prácticas agrícolas dirigidas a la recuperación de las palmas. Aunque menos explorada, la partición de asimilados hacia la producción de sustancias químicas de defensa puede ser un factor importante en la aparición y el desarrollo de los síntomas de la PC (Rocha et al. 2005).

Las variedades de palma aceitera contemporáneas se caracterizan por el elevado potencial de producción de racimos y de acumulación de aceite. La palma aceitera es el cultivo oleaginoso con el mejor desempeño, ya que se pueden lograr producciones comerciales de fruta de 35 o más toneladas por hectárea por año, lo cual puede equivaler a ocho o más toneladas de aceite del mesocarpio. Además, la tasa de incremento de altura del tronco y la longitud de las hojas por lo general es menor en comparación con las variedades tradicionales. Estas características de compactación y de precocidad son de importancia en el mejoramiento genético, pero podrían predisponer a la palma aceitera a la PC en condiciones ambientales desfavorables, pues se reduce el tamaño del sistema radical y se estarían sintetizando menos sustancias de defensa, lo que puede causar predisposición a los microorganismos potencialmente patogénicos.

Los suelos donde se cultiva la palma aceitera podrían estar microbiológicamente degradados, lo cual podría afectar el desarrollo del sistema radical. Para restaurar la salud microbiológica del suelo y acelerar la colonización por parte de los microorganismos benéficos, este puede ser acondicionado con enmiendas físicas, químicas y orgánicas. Las enmiendas pueden mejorar significativamente la estructura del suelo, la disponibilidad de nutrientes y la actividad de las poblaciones microbiológicas del suelo (Roldán et al. 1996).

Se ha demostrado que la aplicación de materia orgánica, ya sea en su forma procesada como compost o aplicada en forma de rastrojos, mejora las propiedades físicas del suelo y proporciona un microambiente favorable para la actividad microbiana (Van de Voorde et al. 2012), lo que constituye la base de las prácticas modernas de la agronomía de la rizosfera. En este sentido, los racimos vacíos de palma aceitera representan un sustrato potencialmente utilizable en la elaboración de compost, pero su alta relación C/N, inicialmente de 50-60:1, debido a su alto contenido de lignina, debe ser reducida a valores cercanos a 15-20:1 al momento de ser incorporado al horizonte superficial (Baharuddin et al. 2008; Segura et al. 2001); esta tesis explora el uso de enmiendas orgánicas elaboradas a partir de racimos vacíos de palma aceitera con relaciones C/N óptimas.

La incorporación del compost de racimos vacíos de palma aceitera en el corto plazo puede corregir algunas deficiencias fisicoquímicas del suelo, por ejemplo, recuperación de los agregados del suelo y mayor disponibilidad de nutrientes. Posteriormente, estaría aumentando la densidad y calidad de las raíces de la palma aceitera, favoreciendo el mayor crecimiento vegetativo, producción de racimos y tolerancia al estrés biótico y abiótico (Albertazzi, 2008; Durán y Ortíz, 1995; Kananam et al. 2011).

Con la aplicación de prácticas hortícolas que estimulen el movimiento de estas sustancias hacia las hojas y las raíces, las palmas aceiteras estarían en capacidad de recuperarse de los síntomas iniciales y leves de la PC. Anteriormente se ha demostrado que la eliminación de hojas y racimos en condiciones agroclimáticas desfavorables favorece la acumulación de carbohidratos no estructurales en el tronco y la translocación hacia los meristemas en crecimiento de la raíz (Basri et al. 2004; Legros et al. 2009b; Milaet-Serra et al. 2006).

La prevención y manejo del trastorno de la PC implica realizar investigación básica para identificar los factores de predisposición y sus posibles interacciones complejas. Existe avance en este aspecto, pero aún queda mucho camino por recorrer. En el periodo de espera, urge definir un protocolo que permita la recuperación más rápida de las plantas afectadas, lo cual fue el propósito fundamental de este trabajo.

Dados estos antecedentes, el presente estudio se enfocó en recuperar el sistema radical de la palma aceitera como estrategia fundamental para lograr la recuperación de los síntomas de la PC. De tal manera, se hizo un particular énfasis en la corrección de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo.

### **OBJETIVO GENERAL**

Evaluar terapias de recuperación en palmas aceiteras en diferentes estados de desarrollo de la PC.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar el acondicionamiento del suelo como práctica para la recuperación de las raíces.
- Probar la efectividad de la cirugía temprana de los tejidos enfermos.
- Examinar el efecto de la ablación de las inflorescencias y racimos.
- Usar las variables morfo/fisiológicas como indicadores de la recuperación de las palmas a la aplicación de las terapias.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Localización del estudio y material vegetal

El estudio se desarrolló en el lote 123 de la Finca Experimental de ASD Costa Rica, en la zona de Coto-Corredores a una elevación de 28 msnm. El clima de la región es údico (< 3 meses secos), con una precipitación anual > 4,000 mm, siendo los meses más lluviosos de mayo a noviembre (algunos con precipitaciones de 800 mm o más). El suelo es de origen aluvial, con predominancia de las texturas arcillo-arenosas.

Las evaluaciones presentadas se realizaron entre noviembre de 2012 y junio de 2014, periodo en el que se logró documentar el proceso de recuperación de las palmas durante dos estaciones secas, la primera de noviembre de 2012 a abril de 2013 (precipitación mensual promedio: 160 mm) y la segunda de diciembre de 2013 a abril de 2014 (precipitación mensual promedio: 140 mm) y una estación lluviosa de mayo de 2013 a noviembre de 2013 (precipitación mensual promedio: 450 mm).

Se utilizaron palmas del clon comercial Tornado de cuatro años de edad en plena producción comercial de racimos. De acuerdo con su sanidad en noviembre de 2012, se identificaron tres categorías de severidad de PC: **PC 0** = palmas sanas, **PC 1** = palmas con síntomas iniciales y **PC 2** = palmas con síntomas leves (Cuadro 1).

**Cuadro 1.** Descripción de los estados de desarrollo de la PC considerados en el estudio.

ESTADO DE DESARROLLO DE LA PC	DESCRIPCIÓN DE LAS PALMAS
<p data-bbox="371 347 639 376"><b>PALMA SANAS (PC 0)</b></p> 	<p data-bbox="858 405 1230 434">Actividad fenológica normal:</p> <p data-bbox="858 461 1402 521">Más de 25 hojas sanas completamente expandidas</p> <p data-bbox="858 548 1402 645">Ausencia de pudriciones en las bases peciolares, folíolos cloróticos o secos y hojas flechas acumuladas</p> <p data-bbox="858 669 1402 766">No existen disminuciones graduales del índice PxS en las hojas nuevas y del sistema radical</p> <p data-bbox="858 790 1251 819">Ciclos reproductivos continuos</p>
<p data-bbox="392 844 619 873"><b>PC INICIAL (PC 1)</b></p> 	<p data-bbox="858 902 1402 963">Clorosis parcial y secamiento de los folíolos en las hojas nuevas</p> <p data-bbox="858 987 1402 1048">Presencia de hojas sanas completamente expandidas</p> <p data-bbox="858 1072 1402 1133">Reducción de la densidad y calidad de las raíces</p> <p data-bbox="858 1158 1235 1187">Acumulación de hojas flechas</p> <p data-bbox="858 1211 1402 1272">Reducción gradual del índice PxS en las hojas nuevas</p>
<p data-bbox="405 1321 606 1350"><b>PC LEVE (PC 2)</b></p> 	<p data-bbox="858 1373 1402 1433">Clorosis parcial y secamiento de los folíolos en las hojas nuevas</p> <p data-bbox="858 1458 1402 1518">Presencia de pudriciones en las bases peciolares</p> <p data-bbox="858 1543 1402 1572">Acumulación y pudrición de hojas flechas</p> <p data-bbox="858 1597 1402 1657">Reducción gradual del índice PxS en las hojas nuevas</p> <p data-bbox="858 1682 1402 1742">Reducción de la densidad y calidad de las raíces</p> <p data-bbox="858 1767 1402 1827">Ciclos reproductivos discontinuos y masculinización</p>

### Ambiente aéreo

El ambiente aéreo se midió utilizando una estación meteorológica automática (marca Watch Dog), localizada en la cercanía del ensayo (2 Km) para el registro de los datos diarios de radiación solar total ( $W/m^2$ ), precipitación (mm), temperatura ( $^{\circ}C$ ) y humedad relativa (%) del aire, y evaporación potencial (mm).

### Terapias de recuperación

Las terapias de recuperación se aplicaron con dos objetivos: 1) recuperar la parte aérea de las palmas desde el punto de vista fotosintético y nutricional, y 2) corregir el deterioro de las condiciones fisicoquímicas y microbiológicas del suelo, teniendo como objetivo último recuperar la densidad y calidad de las raíces finas (Cuadros 2 y 3).

**Cuadro 2.** Matriz que muestra las combinaciones de las tres severidades de PC en palmas aceiteras del clon Tornado y las cuatro terapias de recuperación aplicadas.

PC	Tratamiento	Número de palmas	Terapia de recuperación			
			Agroquímicos al follaje	Acondicionamiento del suelo	Ablación de estructuras reproductivas	Cirugía del tejido enfermo
<b>0</b>	T1	10				
	T2	10	Testigo palmas sanas			
<b>1</b>	T3	10				
	T4	10				
	T5	10	Testigo palmas enfermas			
<b>2</b>	T3	10				
	T4	10				
	T5	10	Testigo palmas enfermas			
<b>total</b>	<b>8</b>	<b>80</b>				



Indica la aplicación de la práctica

Indica la ausencia de la práctica

### **Caracterización geomorfológica, física, química y microbiológica del suelo**

Se realizaron mediciones del microrelieve del lote en enero de 2013. Las mediciones físicas se realizaron entre los 0 y 120 cm de profundidad en noviembre de 2012, y las químicas en los primeros 70 cm de la superficie de suelo en el mes de mayo de 2014, época de alta precipitación (580 mm). En noviembre de 2013 se realizó un muestreo sistemático de microbios indicadores selectos de la rizosfera, mediante el cual se identificaron los grupos filogenéticos y géneros de microorganismos benéficos y potencialmente patogénicos, realizado en el laboratorio LAMA (Laboratorio de Análisis Molecular Agropecuario).

Se midió la pendiente con un clinómetro (marca Suunto, modelo Tandem-360PC) en 30 puntos distribuidos en todo el lote, los cuales fueron georeferenciados con un GPS marca Garmin 62 SC. Posteriormente, se generó el mapa del relieve utilizando el programa Surfer versión 8 (compañía Golden Software) y la guía de clasificación del relieve del National Soil Survey Center (Schoeneberger et al. 2002).

#### **Análisis físico**

En cada horizonte del perfil del suelo se determinó la profundidad efectiva, la densidad aparente, la porosidad total, el espacio aéreo, la conductividad hidráulica, la humedad gravimétrica y volumétrica, la textura y el porcentaje de arcilla ponderado del suelo. Además, se determinó el porcentaje de humedad volumétrica del suelo (HV, %) a través del tiempo, para lo cual se realizaron mediciones mensuales de los 80 cm superficiales del suelo en un punto alrededor de 20 palmas distribuidas en el lote utilizando un TDR (time domain reflectometer, marca Eijkelkamp, modelo MP406-ICT).

**Cuadro 3.** Descripción de las terapias para la recuperación de palmas aceiteras afectadas por la PC.

TERAPIA	DESCRIPCIÓN DE LA TERAPIA DE RECUPERACIÓN
Aplicación de agroquímicos que mejoraron las defensas de las plantas	<p>Foliveex (polisacáridos), 4 g/l; Foliveex multiminerales, 2 ml/l; Kmax, 4 ml/l; Mgmax, 4 ml/l y Alexin, 2 ml/l</p> <p>Se aplicaron 2 litros de la solución por palma cada 7 días, durante 18 meses. Desde febrero de 2013, se incluyeron aplicaciones cada dos semanas de: Urea, 2 g/l; sulfato de potasio, 5 g/l; sulfato de magnesio, 3 g/l y pentaborato de sodio, 3 g/l</p>
Cirugía del tejido enfermo	<p>Se eliminó el tejido afectado de la base peciolar, sobre las heridas se aplicó la solución de Kilol, 2.5 ml/l; Sevin, 5 ml/l; metalaxil MZ, 3 g/l; cosmoin, 0.5 ml/l; y cosmoagua, 1 ml/l</p> <p>Cicatrización: Las heridas fueron cubiertas con el sellador Agrofixer, 10 ml/cirugía</p>
Ablación de estructuras reproductivas	<p>Inflorescencias y racimos removidos mensualmente durante 18 meses</p>
Acondicionamiento del suelo	<p>Corrección de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo:</p> <p>Drenaje: Evacuación del agua superficial</p> <p>Descompactación superficial de la rodaja</p> <p>Incorporación a la rodaja de 12.5 kg de humitec 80, 2 kg de Kmag, 30 g de sulfato de zinc, y 600 kg de compost de racimos vacíos de palma aceitera</p>

### **Análisis químico**

Se cuantificó el contenido de elementos minerales presentes entre 0 y 70 cm de la superficie del suelo, y se determinó el pH, la acidez intercambiable, el porcentaje de saturación de acidez, la concentración de Ca, Mg, K y P y el porcentaje de C, N, Fe, Mn, Zn y Cu y las relaciones C/N, Ca/Mg, Mg/K y (Ca+Mg)/K.

### **Análisis microbiológico**

La diversidad microbiológica de los grupos filogenéticos y géneros indicadores de importancia agronómica fueron obtenidos a partir de una muestra compuesta de la rizosfera de cinco palmas del tratamiento testigo y cinco de los tratamientos en que se realizó el acondicionamiento del suelo, en cada palma la muestra se tomó en los primeros 10 cm de profundidad del suelo a un metro de distancia de la base del tronco. En el laboratorio LAMA, se identificó el ADN de los grupos filogenéticos y géneros de microorganismos de la rizosfera y se cuantificó su expresión mediante la técnica de PCR en tiempo real (Thermo Scientific, modelo PikoReal-96) utilizando sondas SYBR Green.

### **Variables morfológicas, de crecimiento y producción**

Las evaluaciones de crecimiento: 1) altura del tronco, 2) número de hojas, 3) longitud del raquis, y 4) Sección transversal del peciolo (PxS) se efectuaron en las 10 palmas de los ocho tratamientos aplicados y se mantuvieron las mismas palmas a lo largo del periodo de observaciones, independientemente del grado de severidad de PC al momento de la evaluación. Las variables se midieron en diciembre de 2012, febrero, mayo y octubre de 2013 y marzo de 2014. Las evaluaciones de la densidad de raíces se realizaron en cinco palmas de los ocho tratamientos aplicados en junio, setiembre y noviembre de 2013 y en enero y mayo de 2014.

#### **Altura del tronco**

La altura del tronco fue medida en centímetros desde la base del tronco de la palma hasta la altura de la hoja No 25 con la ayuda de una cinta métrica.

**Número de hojas**

Se cuantificó el total de hojas verdes a partir de la hoja No. 1 de acuerdo con la filotaxia específica de la palma aceitera. Se tomaron en cuenta hojas con folíolos cloróticos o sectores con necrosis, siempre y cuando estos fueran menores al 30 % de la superficie de la hoja.

**Longitud del raquis**

Se midió la longitud de la hoja No. 9 en centímetros, midiendo el raquis desde la punta de la hoja hasta los folíolos vestigiales presentes en la base, utilizando una cinta métrica.

**Sección transversal del peciolo (PxS)**

El valor de PxS expresado en centímetros cuadrados es un indicador del vigor de las palmas (Corley et al. 1971), que se cuantificó midiendo el ancho y la longitud del peciolo de las hojas No. 9, utilizando un calibre digital (marca Mitutoyo).

**Densidad de raíces**

Se determinó la densidad de raíces con un barreno de 750 cm<sup>3</sup> diseñado especialmente para el muestreo de raíces (marca Eijkelkamp). Se realizaron muestreos a dos profundidades (0-15 cm y 15-30 cm), a una distancia de 0,5 m, 1 y 2 m del tronco. Las raíces extraídas se lavaron con agua y luego se utilizó el paquete informático “WinRhizo” con el cual se cuantificó la longitud total de las raíces, este resultado se dividió entre el volumen del cilindro para obtener la densidad de raíces definida en términos de cm/cm<sup>3</sup> (Gutiérrez et al. 2014).

**Severidad de la PC**

Se realizaron evaluaciones mensuales de la severidad de PC en las 80 palmas utilizando una escala del 0 a 2. Esta escala cuantificó el grado de desarrollo de la PC, donde

0 correspondía a una palma sana, 1 a una palma con síntomas iniciales y 2 a una palma con síntomas leves de PC (Cuadro 1).

### **Producción de racimos**

Se cuantificó en las 10 palmas de los tratamientos T1, T2, T4 y T5 y corresponde a la sumatoria de kilogramos de fruta fresca producidos por palma en el periodo de noviembre del año 2012 a abril del año 2014 (1.5 años).

### **Características del racimo y contenido de aceite**

Fueron determinadas a partir de una muestra de 11 racimos maduros de los tratamientos T1, T2, T4 y T5 en noviembre del año 2013.

### **Variables fisiológicas**

Debido a la naturaleza dinámica de la PC, y de acuerdo con la severidad de PC al momento de la evaluación, la cual no necesariamente era la misma que tenían las palmas al inicio del estudio (noviembre de 2012), se midieron los folíolos basales, mediales y distales de las hojas No. 1, 9 y 17 de cinco palmas de las tres severidades de PC en las estaciones seca (febrero-marzo) y lluviosa (setiembre-octubre) del año 2013 y seca del año 2014 (marzo).

### **Potencial hídrico de las hojas**

Se evaluó con una cámara de presión de Scholander (modelo PMS 1000, Oregon) de 5:00 a 6:00 am y de 11:00 am a 1:00 pm.

### **Conductancia estomática, temperatura y transpiración**

Se midieron utilizando un autoporómetro (modelo Li-Cor 1600, Li-Cor Biosciences, Lincoln, NE) equipado con un sensor de radiación fotosintéticamente activa ( $\mu\text{mol fotones m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) que permitió caracterizar el microambiente lumínico de las mediciones realizadas en el folíolo 35 de la punta hacia la base. Las mediciones se efectuaron de 8:00 am a 10:00 am y de 11:00 a 1:00 pm.

## **Fotosíntesis**

Los cursos diurnos de la fotosíntesis se obtuvieron en la estación lluviosa del año 2013 (setiembre, 513 mm) y seca del año 2014 (febrero, 77 mm), los datos fueron tomados entre las 7:00 y las 15:00 horas, con intervalos de una hora entre cada ronda, se utilizó un sistema portátil para la medición de la fotosíntesis (modelo Li-6400XT, Li-Cor Biosciences, Lincoln, NE). Se midió la radiación fotosintéticamente activa (RFA), la fotosíntesis neta (A), la conductancia estomática ( $g_s$ ) y la transpiración (E) de los folíolos mediales de la hoja No. 9 de tres palmas por severidad de PC.

## **Nutrientos en las hojas**

Se analizó el contenido foliar de nutrientes a partir de muestras compuestas de folíolos basales, mediales y distales de la hoja No. 9 de cinco palmas por severidad de PC. Este muestreo se realizó en el mes de mayo de 2014. Se determinaron los contenidos de N, P, Ca, K, Mg, S, Mn, Fe, Cu, Zn y B.

## **Análisis e interpretación de los datos experimentales**

Se evaluaron ochenta palmas del clon Tornado, las cuales fueron seleccionadas al azar y de acuerdo con la sintomatología de la PC (Cuadro 1). Cada palma fue considerada como unidad experimental o repetición. A diez palmas sin síntomas (PC0) se aplicó el tratamiento de recuperación (T1) y se dejaron 10 palmas como testigo (T2). La respuesta del tratamiento T1 se evaluó mediante una prueba de  $t$  comparándola con el testigo T2 (Cuadro 2).

Las terapias de recuperación T3 y T4 fueron aplicadas sobre palmas con síntomas iniciales (PC 1) y leves (PC 2) de la enfermedad. En cada nivel de PC se evaluaron treinta palmas, de las cuales diez se mantuvieron como testigo: T5 (Cuadro 2). La respuesta a los tratamientos T3 y T4 se evaluó mediante un análisis de varianza siguiendo un modelo totalmente al azar con diez repeticiones (palmas) por tratamiento y treinta repeticiones (palmas) por cada nivel de severidad (Cuadro 2), en un arreglo tipo parcelas divididas de acuerdo con la siguientes fuentes de variación y grados de libertad.

<b>Fuente de Variación</b>	<b>GL</b>
Repeticiones (palmas)	9
Severidad	1
Tratamientos	2
Interacción Severidad x Tratamientos	2
Error	45
<b>Total</b>	<b>59</b>

El análisis estadístico de las variables de crecimiento se realizó con los datos de la evaluación realizada en marzo de 2014. De tal manera, en el análisis de la varianza se consideraron dos fuentes de variación: la severidad inicial de PC y los tratamientos de recuperación. La significancia de la diferencia entre medias de las severidades de PC se verificó mediante el método de la diferencia mínima significativa (dms), mientras que los tratamientos T3 y T4 fueron comparados contra el testigo (T5) mediante la prueba de Dunnet a un nivel de significancia de  $P < 0,05$ .

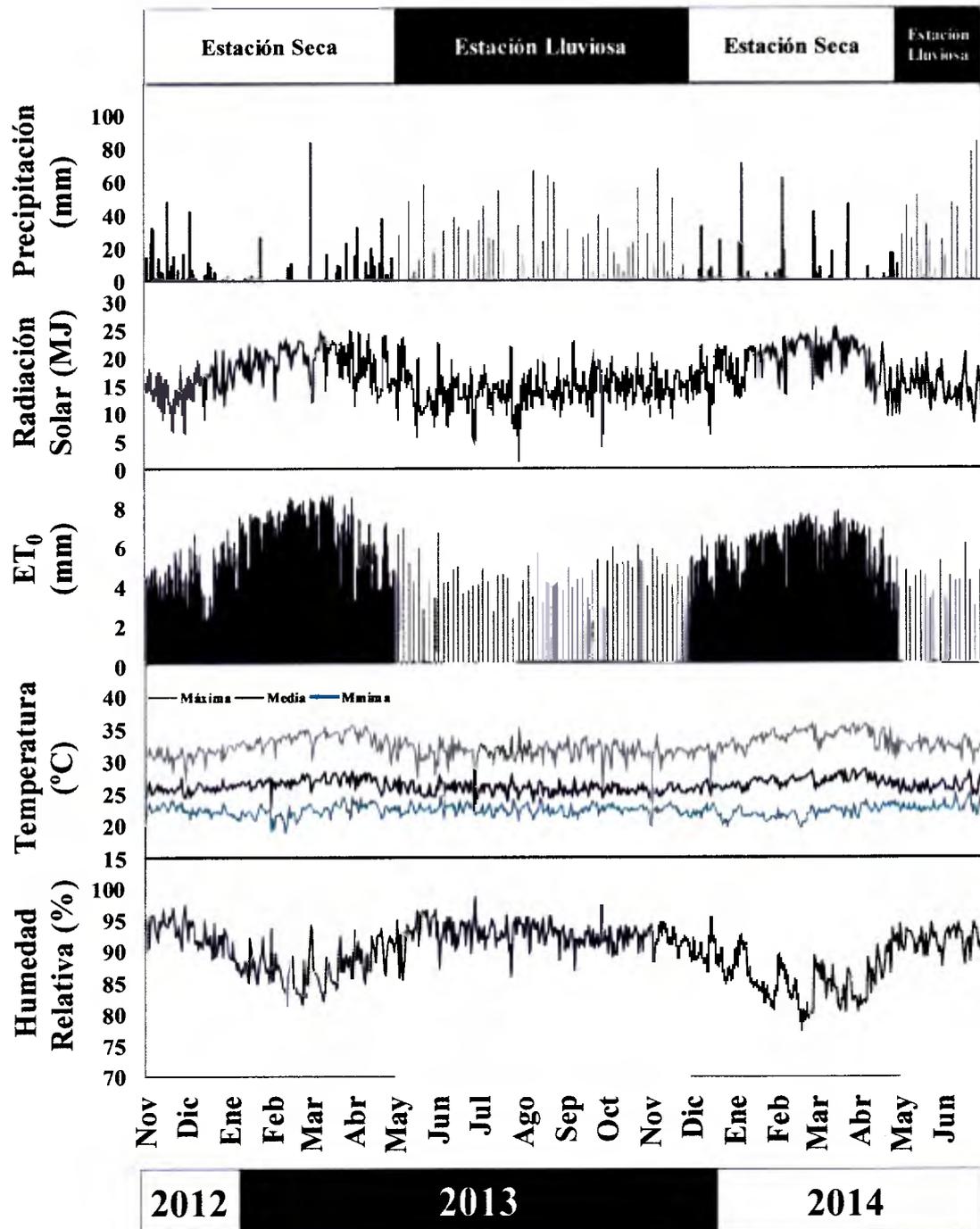
Adicionalmente, se analizaron las variables de producción y las características del racimo, mediante una prueba de  $t$ , en donde las medias de los tratamientos T4 y T5 fueron comparadas a un nivel de significancia de  $P < 0,05$ . En el caso de las variables fisiológicas, se realizó un análisis de la varianza entre las tres categorías de severidad de PC mediante la comparación múltiple de todos los pares de medias utilizando la prueba de DGC con un grado de significancia del  $P < 0.05$ .

## RESULTADOS

### **Condiciones climáticas del sitio**

Se presentó una marcada estacionalidad de todas las variables climáticas durante el desarrollo del estudio. En las estaciones secas de noviembre de 2012 a abril de 2013 (precipitación mensual promedio: 131 mm) y de diciembre de 2013 a abril de 2014 (precipitación mensual promedio: 136 mm), se presentó la menor precipitación y humedad relativa, mientras que la radiación y la evaporación potencial fueron las más altas; 25,3 MJ y 8,6 mm por día, respectivamente. Además en estas estaciones secas se registró la temperatura máxima de 35,7 °C y mínima de 18,6 °C. Durante las estaciones lluviosas, de mayo a noviembre de 2013 (precipitación mensual promedio: 445 mm) y mayo a junio de 2014 (precipitación mensual promedio: 560 mm), la radiación solar y la evaporación potencial disminuyeron sustancialmente con respecto a la estación seca, por el contrario la humedad relativa superó el 85%. La temperatura media del sitio durante el periodo del estudio fue de 26 °C (Fig. 1).

La precipitación anual del año 2012 (3343 mm) y 2013 (3350 mm), disminuyó considerablemente con respecto al 2011, año en el que se registraron 5900 mm de lluvia. Estas variaciones en la precipitación se reflejaron en la humedad volumétrica del suelo, de manera que, en las estaciones secas de noviembre 2012 a abril de 2013 y diciembre de 2013 a abril de 2014, la humedad volumétrica del suelo fluctuó entre 30 y 34% (Fig. 5), mientras que en la primera estación lluviosa evaluada, de mayo a noviembre de 2013, esta varió entre 40 y 42%. En la segunda estación lluviosa evaluada, de mayo a junio de 2014, la HV se mantuvo en 33%.

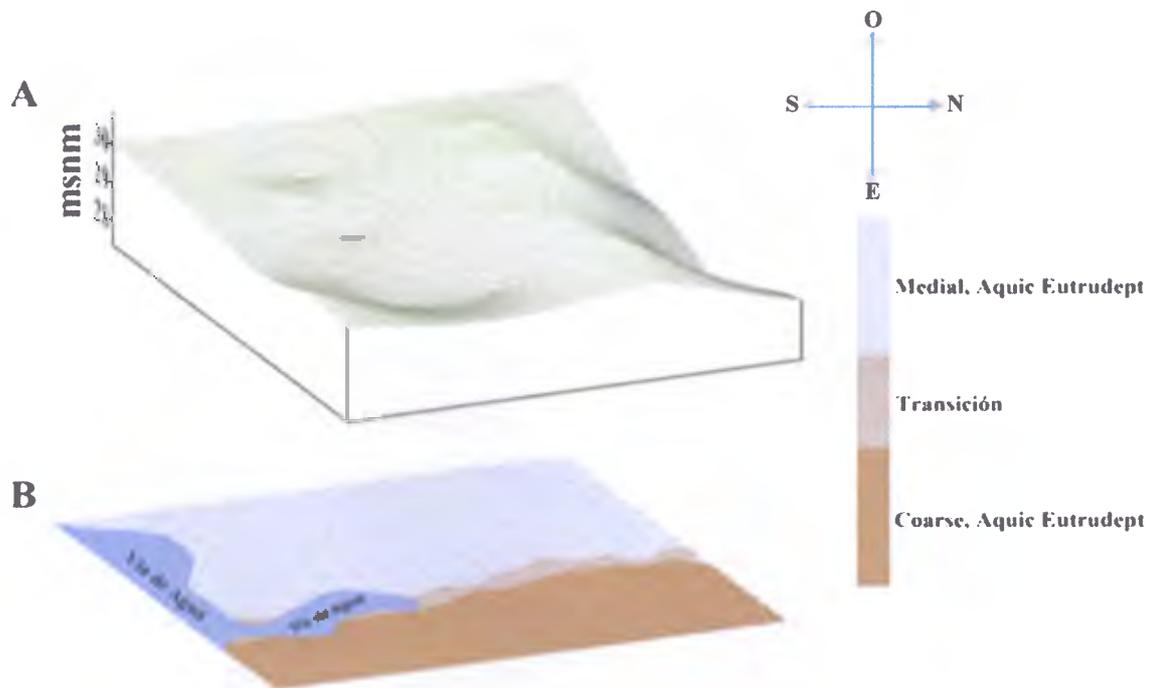


**Figura 1.** Precipitación, radiación solar total, evaporación potencial ( $ET_0$ ), temperatura y humedad relativa del aire medidos diariamente entre noviembre de 2012 y junio de 2014. Información obtenida de una estación automática Watch Dog.

### **Geomorfología y física del suelo**

El área del estudio se ubicó en la cercanía de la llanura de sedimentación aluvial del río Coto Colorado, un área con altos contenidos de calcio, magnesio y potasio, donde existe una alta variabilidad espacial de las características físicas del suelo. Las prácticas de agricultura intensiva empleadas en los cultivos del banano y palma aceitera desde hace más de 80 años, han provocado un deterioro progresivo de la estructura natural de los suelos de este abanico aluvial (Torres, 2013), producto de la compactación causada por el laboreo intensivo y la mecanización con equipos pesados. En este sitio los contrastes en las propiedades edáficas, principalmente las físicas, se asociaron a la distancia en que se encontraba la unidad edáfica del cauce de los ríos. Por consiguiente, el proceso de formación de estos suelos varió en función del tamaño de las partículas arrastradas en los diferentes episodios aluviales y a la topografía del terreno.

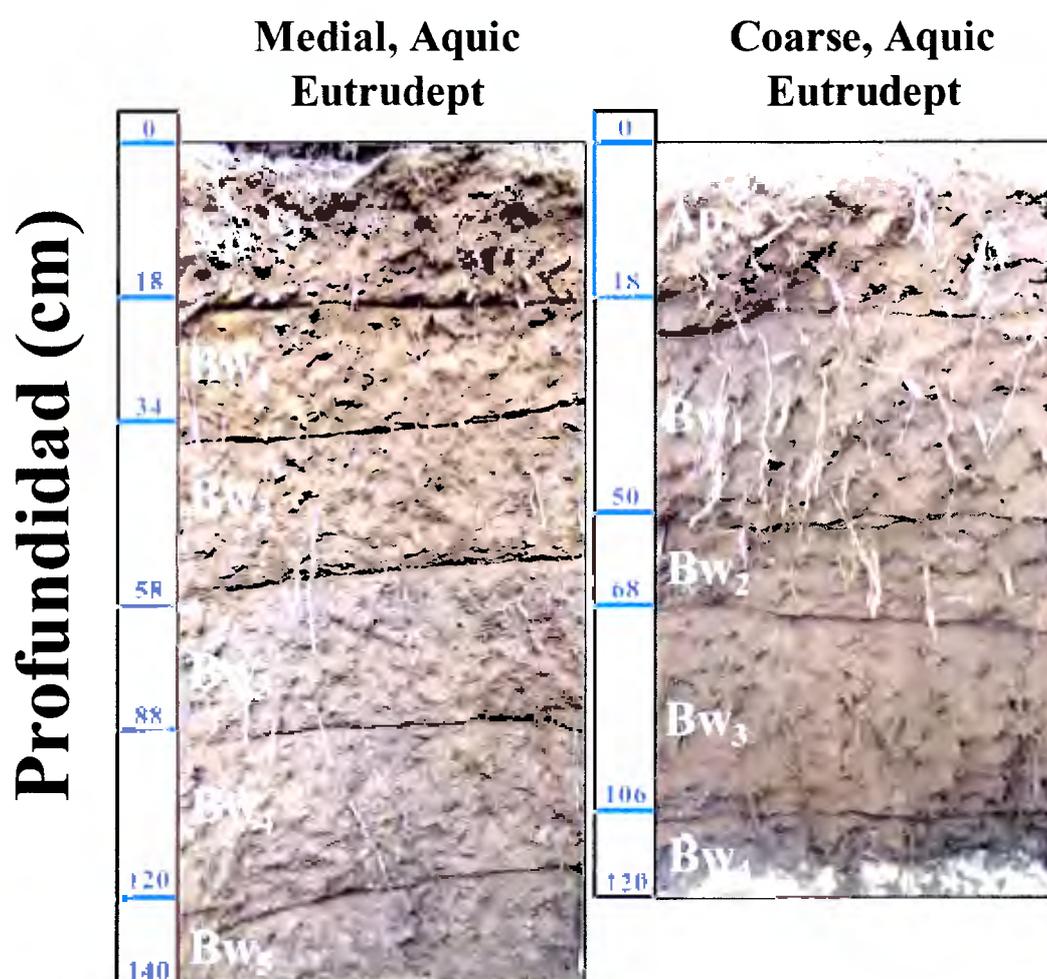
De acuerdo con el microrelieve del lote, existieron ligeras variaciones en la pendiente del terreno. En los extremos noreste y sureste del lote, zona de menor altitud, la pendiente era fuertemente ondulada (3 % a < 10 %), mientras que la zona noroeste y suroeste, área más elevada, la pendiente era plana (0 % a < 0.5 %) (Fig. 2A). La zona de menor altitud, presentó un drenaje moderadamente lento, mientras que en la zona alta, el drenaje fue de lento a muy lento. El efecto de la pendiente unido a las depresiones cóncavas en la rodaja de las palmas, contribuyeron a la acumulación del agua de lluvia en estos sitios, lo cual provocó el aumento de la humedad volumétrica entre 0 y 30 cm de profundidad del suelo durante los meses de mayor precipitación.



**Figura 2. A:** Variaciones en el relieve del sitio. **B:** distribución espacial de las unidades edáficas. Los diagramas fueron generados a partir de 80 palmas seleccionadas en el estudio y la descripción de dos calicatas. La interpolación se realizó con el método Kriging; utilizando el programa Surfer 8.

Es común encontrar una mayor acumulación de partículas gruesas (arenas y limos gruesos), en la parte más cercana al cauce del río en la zona de influencia aluvial, lo cual dio origen a la unidad edáfica Coarse, Aquic Eutrudept (zona baja), mientras que la mayor proporción de los sedimentos finos (arcillas y limos finos) se acumularon en el área más alejada del cauce, formándose la unidad edáfica Medial, Aquic Eutrudept (zona alta) (Fig. 2B). Considerando la distribución espacial de las dos unidades edáficas; el suelo Medial, Aquic Eutrudept equivale al 60% del área y el suelo Coarse, Aquic Eutrudept al 30%; el 10% restante corresponde a una zona de transición (Fig. 2B).

Las dos unidades edáficas correspondieron a suelos con alto potencial productivo. No obstante, las limitaciones del sitio se definieron a nivel superficial en el horizonte Ap. La unidad edáfica de la zona alta se caracterizó por tener un tamaño de partícula más fina (franco arcillo arenoso) y mayor profundidad efectiva (140 cm), en comparación con el suelo de la zona baja, donde predominó la arena franca y la profundidad efectiva es menor (120 cm). La textura del suelo de la zona alta es media, mientras que en la zona baja es gruesa (Fig. 3).



**Figura 3.** Profundidad, nomenclatura de los horizontes y clasificación taxonómica de las dos unidades edáficas presentes en el área donde se implementaron las terapias de recuperación en palmas del clon Tornado. Ambas unidades presentan limitaciones debidas al mal drenaje superficial (horizonte Ap). Para la clasificación se utilizó la clave de la taxonomía de suelos del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA).

En el horizonte Ap de la unidad Coarse, Aquic Eutrudept (zona baja), existieron mayores limitaciones para el desarrollo del sistema radical, ya que el suelo presentaba menor porosidad, menos espacios aéreos y conductividad hidráulica, razón por lo cual se saturó con facilidad después de los eventos frecuentes de alta precipitación (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Propiedades físicas de las dos unidades edáficas y del horizonte superficial Ap correspondientes al área donde se implementaron las terapias de recuperación en palmas del clon Tornado. Los valores son promedios ponderados tomando en cuenta la profundidad de los horizontes en cada uno de los perfiles. Los datos fueron tomados en noviembre de 2012.

Propiedad	Unidad edáfica		Horizonte Ap	
	Medial, Aquic Eutrudept	Coarse, Aquic Eutrudept	Coarse, Aquic Eutrudept	Medial, Aquic Eutrudept
Profundidad efectiva (cm)	145,0	115,0	18,0	18,0
Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	1,1	1,1	1,3	1,0
Densidad de partículas (g/cm <sup>3</sup> )	2,1	2,4	2,1	2,1
Porosidad Total (%)	48,0	51,1	39,2	51,1
Espacio aéreo (%)	13,2	22,6	12,2	22,1
Conductividad hidráulica (cm/h)	0,4	1,1	1,0	1,1
Retención de humedad (%) a 330 KPa	50,0	34,8	41,0	43,0
Retención de humedad (%) a 1500 KPa	42,7	21,1	17,0	33,0
Agua Útil (%)	7,2	13,7	24,0	10,0
Humedad gravimétrica el día del muestreo (%)	31,2	25,0	21,2	28,5
Textura ponderada	franco arcillo arenoso	franco arenoso	franco arenoso	franco arcillo arenoso
Cantidad de arcilla (%)	29,6	10,6	15,0	25,0

### **Distribución espacial de la PC en función de la humedad volumétrica del suelo**

Aunque las dos unidades edáficas comparten la misma infraestructura de drenajes, su capacidad de evacuar el agua de escorrentía fue diferente. De tal manera, con el inicio de la estación lluviosa en mayo de 2013, la humedad volumétrica (HV) aumentó a 38% en la zona baja del lote, lo que generó un incremento en los casos de PC (Fig. 4). Posteriormente, durante los siguientes meses de alta precipitación (junio a noviembre), la HV se mantuvo en 42%, provocando que la PC se extendiera por toda el área. A partir de diciembre de 2013, cuando la HV disminuyó a 30%, las palmas de la zona alta mostraron una importante recuperación. Seguidamente, en el periodo de abril a junio de 2014, la recuperación de las palmas se extendió por todo el lote, mientras que los parches de color amarillo (PC 2) correspondían a las 30 palmas del tratamiento testigo que estaban distribuidas aleatoriamente por toda el área (Fig. 4).



### Propiedades químicas del suelo

De acuerdo con las propiedades químicas, el suelo del área de estudio contiene contenidos de Ca superiores a 15 cmol (+)/L y de Mg superiores a 2,5 cmol (+)/L, que son los nutrientes mayoritarios en el complejo de intercambio catiónico, por lo que fue clasificado como un suelo éutrico.

El drenaje superficial se realizó en la estación lluviosa de 2013, mediante la construcción de canales de drenaje específicos al micro-relieve de cada palma, con el objetivo de evacuar el agua de escorrentía hacia la red de canales cuaternarios del lote.

En comparación con el testigo, el acondicionamiento del suelo causó la disminución de la acidez cmol (+)/L y de la saturación de acidez; la primera se redujo de 2,32 a 0,23 cmol(+)/L y la segunda de 8 a 0,7 %. La cantidad de Mg aumentó de 5,15 a 6,65 cmol(+)/L, el contenido de K incrementó notablemente de 1,39 a 7,16 cmol(+)/L y la CICE del suelo se incrementó de 29,16 a 32,93 (cmol (+)/L). No obstante, con el incremento de cinco veces en el contenido de K del suelo, las relaciones entre cationes Ca/K, Mg/K y (Ca+Mg)/K disminuyeron por debajo del nivel crítico (Cuadros 5 y 6).

**Cuadro 5.** Macro nutrientes (Ca, Mg, K, P y N), CICE, pH, acidez, saturación de acidez y la relación C/N del suelo donde se aplicaron las terapias de recuperación implementadas en palmas del clon Tornado. Los resultados provienen de muestras compuestas de 10 palmas por terapia. Los parámetros considerados deseables para la palma aceitera están sombreados con gris. En el proceso de análisis se utilizó la solución extractora Melich 3.

Terapia	pH H <sub>2</sub> O	(cmol (+)/L)						(mg/L)	(%)			Relación
		Acidez	Ca	Mg	K	CICE	P	SA	C	N	C/N	
<b>Terapia</b>	<b>Nivel Crítico</b>	<b>5,5-6,5</b>	<b>&lt;0,3</b>	<b>4-15</b>	<b>1,1-2,5</b>	<b>0,4-0,9</b>	<b>5-25</b>	<b>15 a 25</b>	<b>&lt;10</b>	<b>1,5-2,5</b>	<b>0,15-0,25</b>	<b>10,0</b>
Tiempo cero	5,3	0,75	27,17	3,60	0,91	32,43	68	3	1,02	0,12	8,5	
Acondicionamiento del suelo	5,9	0,23	18,89	6,65	7,16	32,93	157	1	3,58	0,32	11,2	
Testigo	5,2	2,32	20,30	5,15	1,39	29,16	38	8	1,92	0,21	9,1	

La concentración de la mayoría de los micronutrientos también aumentó con el acondicionamiento del suelo, sobresaliendo el P y el Zn. En el primero la concentración se incrementó de 38 a 157 mg/L y en el segundo de 8 a 20 mg/L. En el caso de Fe y Mn, la concentración aumentó en menor proporción, mientras que la concentración de Cu fue la única que disminuyó, pasando de 50 mg/L en el testigo a 25 mg/L en el suelo acondicionado (Cuadro 6).

**Cuadro 6.** Micro nutrientes (Fe, Mn, Zn y Cu), y relaciones catiónicas (Ca/Mg, Ca/K, Mg/K y (Ca+Mg)/K), del suelo donde se aplicaron las terapias de recuperación implementadas en palmas del clon Tornado. Los parámetros considerados deseables para la palma aceitera están sombreados con gris. En el proceso de análisis se utilizó la solución extractora Melich 3.

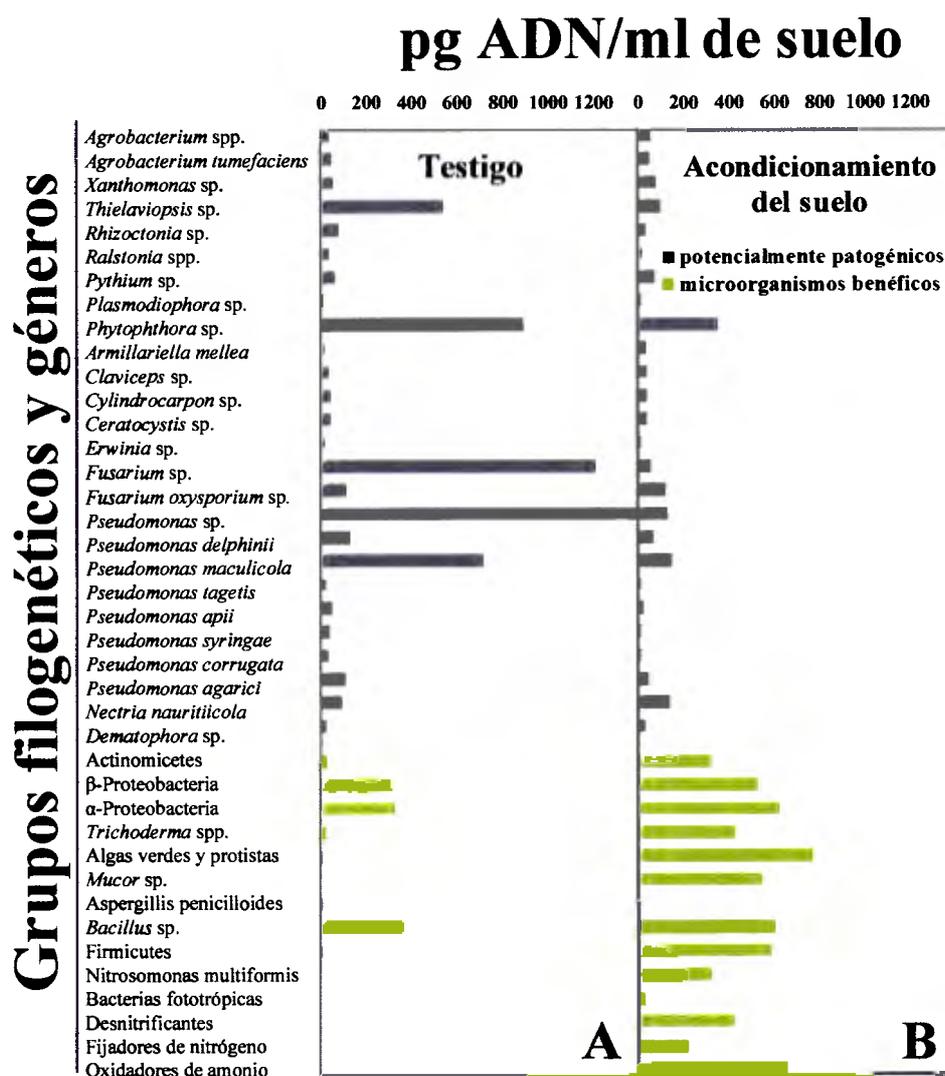
		cmol(+)/L				mg/L			
		Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	(Ca+Mg)/K	Fe	Mn	Zn	Cu
Terapia	Nivel Crítico	2-5	5-25	2,5-15	10-20	30-100	30-100	3-10	5-20
<b>Tiempo cero</b>		7,5	29,9	4,0	33,8	300	31	3,7	94
<b>Acondicionamiento del suelo</b>		2,8	2,6	0,9	3,6	324	48	20,0	25
<b>Testigo</b>		3,9	14,6	3,7	18,3	310	47	8,1	51

### Propiedades microbiológicas del suelo

En noviembre de 2013, 12 meses después del inicio de la aplicación de las terapias de recuperación, se identificaron 29 grupos filogenéticos en la rizosfera de las palmas del tratamiento testigo, de los cuales 26 eran potencialmente patogénicos y tres correspondían a microorganismos benéficos. Se cuantificaron altas concentraciones (por encima de 300 pg ADN/ml de suelo), de *Thielaviopsis* sp., *Phytophthora* sp., *Fusarium* sp., *Pseudomonas maculicola* y *Pseudomonas* sp. Como principales microorganismos benéficos se determinaron altas concentraciones de  $\alpha$  y  $\beta$ -proteobacterias y *Bacillus* sp. (Fig. 5A).

Con el acondicionamiento del suelo aumentó la diversidad de microorganismos benéficos en la rizosfera de cuatro a 12 géneros, lo cual es equivalente a aumentar de 1065 a 6000 pg ADN/ml de suelo. Como principales microorganismos benéficos se

identificaron: Actinomicetos,  $\alpha$  y  $\beta$ -proteobacterias, *Trichoderma* spp., *Mucor* sp., algas verdes y protistas, *Bacillus* sp., *Streptomyces* spp., Firmicutes, *Curtobacterium* spp., *Nitrosomonas multiformis*, bacterias nitrificantes y oxidadores de amonio, mientras que la concentración de los grupos potencialmente patogénicos se redujo notablemente, identificándose *Pseudomonas* sp. y *Fusarium* sp. Sobresale el caso de *Phytophthora* sp., que presentó una reducción de 776 a 248 pg ADN/ml de suelo (Fig. 5B).

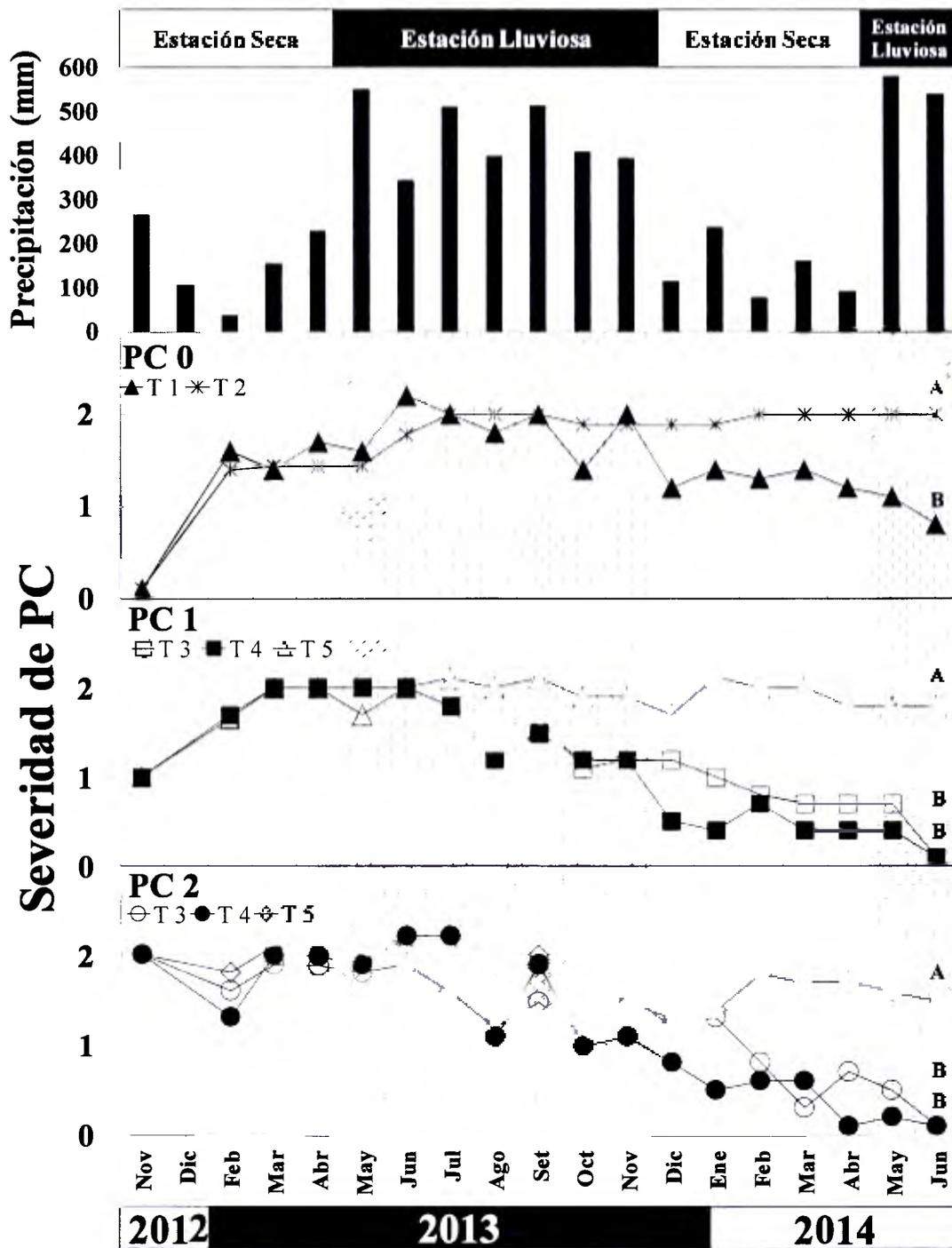


**Figura 5.** Abundancia expresada en pg ADN/ml de suelo, de los principales grupos filogenéticos y géneros presentes en la rizosfera 12 meses después de la aplicación de las terapias de recuperación. A: Testigo absoluto y B: Acondicionamiento del suelo. Los resultados corresponden a la estación lluviosa de 2013 (noviembre), a partir de una muestra compuesta de cinco palmas de cada tratamiento; las muestras se tomaron en los primeros 10 cm de profundidad del suelo a 1 metro de la base del tronco.

### **Comportamiento de la PC en función de las terapias de recuperación**

En noviembre de 2012, se distinguieron tres niveles de severidad de la PC: palmas sanas (PC 0), palmas con síntomas iniciales de PC (PC 1) y palmas con síntomas leves del trastorno (PC 2). A partir de mayo de 2013, en plena estación lluviosa (precipitación de 550 mm), todas las palmas de los ocho tratamientos presentaron síntomas leves del trastorno de la PC.

Al entrar a la estación seca de 2014, los tratamientos T3 y T4 de las severidades de PC 1 y PC 2, presentaron una reducción progresiva de los síntomas del trastorno, pero no ocurrió así en las palmas del tratamiento testigo absoluto que se mantuvo en PC 2. Finalmente, en junio de 2014, 19 meses después de iniciar la aplicación de las terapias de recuperación, las palmas de los tratamientos T3 y T4 se recuperaron completamente de los síntomas de PC, y nuevamente fueron consideradas como palmas sanas (PC 0). Por el contrario, las palmas del tratamiento testigo continuaron presentando síntomas de PC 2 (Cuadro 1 y Fig. 6).

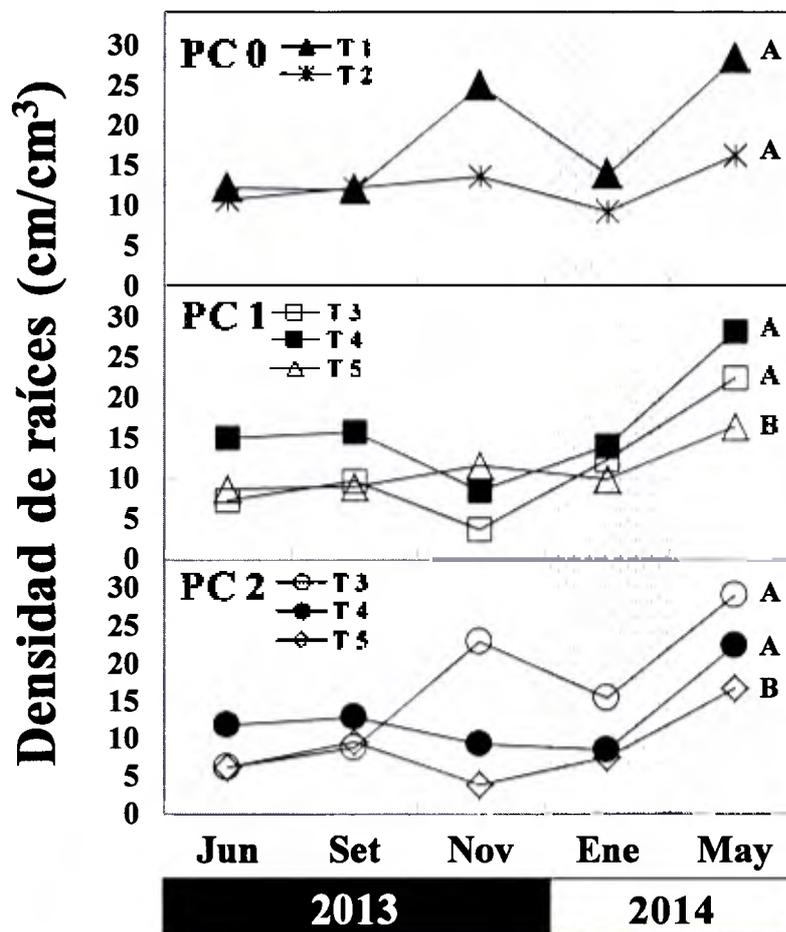


**Figura 6.** Avance del trastorno de la PC a través del tiempo en función de la severidad inicial de PC y el tratamiento de recuperación implementado en palmas del clon Tornado. Las curvas de severidad se construyeron a partir de mediciones mensuales en 10 palmas por tratamiento. Las categorías PC 0 = palma sana, PC 1 = PC inicial y PC 2 = PC leve, corresponden a la severidad inicial.

Con el objetivo de corroborar la recuperación visual de las palmas de los tratamientos T3 y T4 que presentaron inicialmente síntomas de PC1 y PC 2, a continuación se describen las diferencias observadas entre los dos tratamientos y el testigo absoluto en las mediciones de crecimiento vegetativo, densidad de raíces, fisiología, producción de fruta y aceite y contenidos nutricionales en las hojas.

### **Densidad de raíces**

Los cambios en los síntomas de PC a través del tiempo y en el crecimiento vegetativo de la parte aérea se relacionaron con la dinámica del sistema radical. Las palmas del tratamiento T3 de la severidad inicial PC 2, presentaron un incremento importante en la densidad de raíces en noviembre de 2013, lo cual coincidió con el incremento del PxS y la altura de tronco a partir de diciembre de ese mismo año (Figs. 7 y 8). La ausencia de los síntomas visuales de PC que presentaron las palmas de los tratamientos T3 y T4 en junio de 2014, fue precedida por el aumento altamente significativo ( $P < 0,01$ ) de la densidad de raíces en mayo, siendo la diferencia del T3 de  $16 \text{ cm/cm}^3$  y del T4 de  $14 \text{ cm/cm}^3$  con respecto al testigo (Fig. 8).



**Figura 7.** Densidad de raíces (cm/cm<sup>3</sup>) en función de la severidad de PC y el tratamiento de recuperación. Las muestras fueron tomadas de 0 a 30 cm de profundidad y a 0,5 y 1 m de distancia en la rodaja de las palmas. En el análisis de varianza, la significancia de la diferencia entre las severidades de PC se verificó mediante el método de la diferencia mínima significativa (dms), mientras que los tratamientos T3 y T4 se compararon con el testigo (T5) mediante la prueba de Dunnet a un nivel de significancia de  $P < 0,01$ . Los resultados son las medias de 7 muestras por tratamiento por fecha de evaluación.

## **Crecimiento**

### **Altura del tronco**

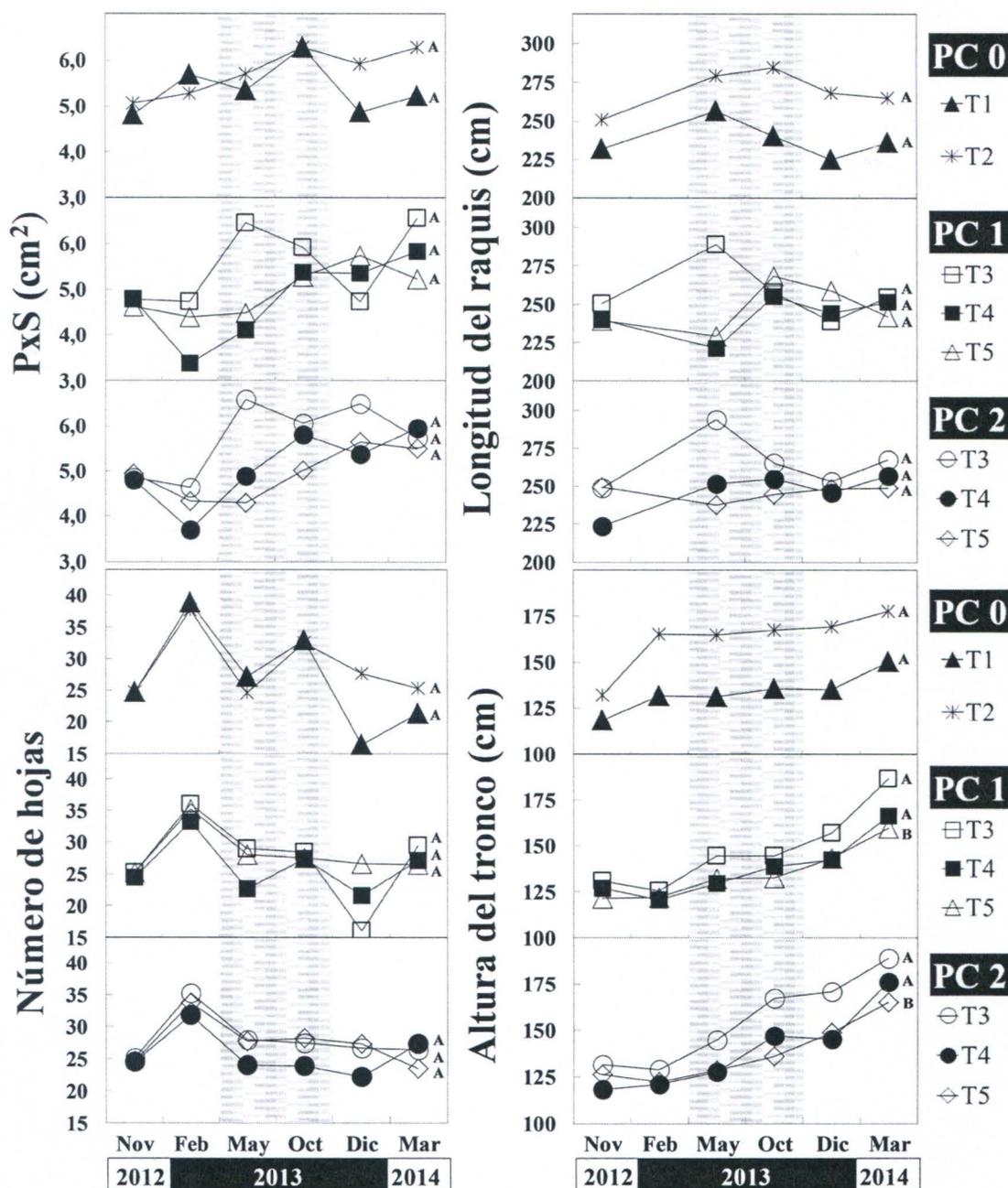
Las palmas pertenecientes a las tres categorías de PC evaluadas no presentaron diferencias significativas en la altura final del tronco. Por el contrario, los tratamientos T3 y T4 causaron un aumento significativo en la altura del tronco con respecto al testigo ( $P < 0,05$ ), siendo la diferencia en la altura del tronco del tratamiento T3 la más alta (25 cm), seguido del T4, con 3 cm (Fig. 8, derecha abajo).

### **Número de hojas y sección transversal del peciolo (PxS)**

La severidad inicial de PC y los tratamientos aplicados no afectaron significativamente la sección transversal del peciolo (PxS) y el número de las hojas que presentaron las palmas al finalizar las evaluaciones de crecimiento (mayo del año 2014). Sin embargo, las dos variables presentaron fluctuaciones estacionales importantes durante todo el estudio (Fig. 8, izquierda). Al inicio de la estación lluviosa, en mayo de 2013, las palmas del tratamiento T3 (ablación) mostraron un PxS mayor con respecto a los tratamientos T4 y el testigo absoluto.

### **Longitud del raquis**

El largo del raquis no fue afectado significativamente por ninguno de los tres tratamientos aplicados, pero la severidad inicial de PC afectó significativamente la longitud final de raquis ( $P < 0,05$ ), teniendo las palmas con severidad inicial de PC 2 una longitud promedio del raquis 20 cm mayor con respecto a las palmas con PC 1 inicial (Fig. 8, derecha arriba).



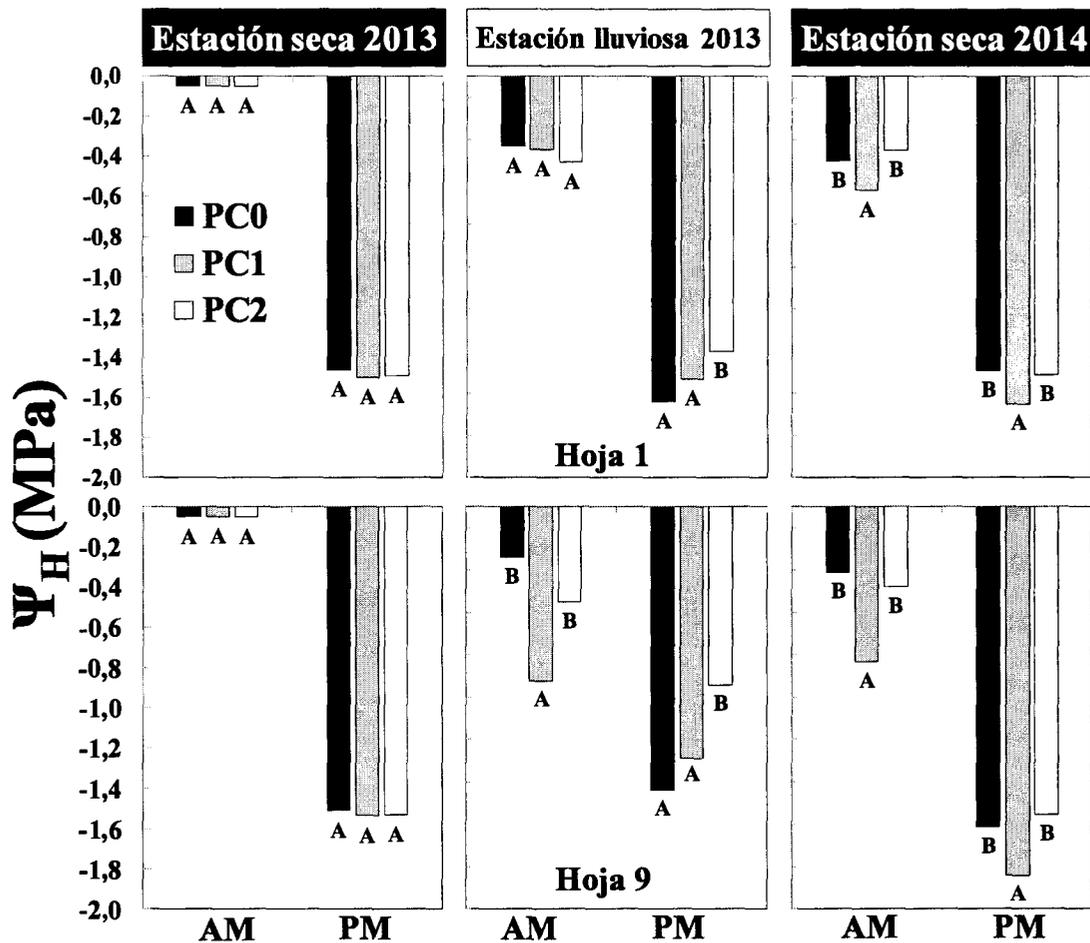
**Figura 8.** Sección transversal del peciolo (PxS) de la hoja No. 9, longitud de raquis de la hoja No. 9, número total de hojas y altura del tronco a través del tiempo en función de la severidad de PC y el tratamiento de recuperación implementado en palmas del clon Tornado. En el análisis de varianza (evaluación de marzo de 2014), la significancia de la diferencia entre las severidades de PC se verificó mediante el método de la diferencia mínima significativa (dms), mientras que los tratamientos T3 y T4 se compararon con el testigo (T5) mediante la prueba de Dunnet a un nivel de significancia de  $P < 0,05$ . Los resultados son las medias de 10 repeticiones por tratamiento por fecha de evaluación.

## **Variables fisiológicas**

### **Potencial hídrico**

Los gradientes de potencial hídrico a lo largo del continuo suelo-planta-atmósfera es la fuerza motriz que permite la absorción y el ascenso de agua líquida a través de los tejidos de las plantas. En la estación seca no se observaron diferencias significativas en el potencial hídrico de las hojas ( $\Psi_H$ ) entre las severidades de palmas evaluadas. Las principales variaciones del  $\Psi_H$  ocurrieron a partir de la estación lluviosa de 2013 durante la tarde, cuando las hojas No. 1 y 9 de las palmas con PC 0 y PC 1 presentaron un  $\Psi_H$  menor que las palmas con PC 2 ( $P < 0,05$ ), mientras que en la mañana únicamente la hoja No. 9 de las palmas con PC 1 mostraron una reducción significativa del  $\Psi_H$  (Fig. 9).

En la estación seca de 2014, bajo una alta demanda evaporativa de la atmósfera, durante la mañana y la tarde las hojas No. 1 y 9 de las palmas con PC 0 y PC 2, presentaron potenciales hídricos significativamente mayores con respecto a las palmas con PC 1 (Fig. 9).

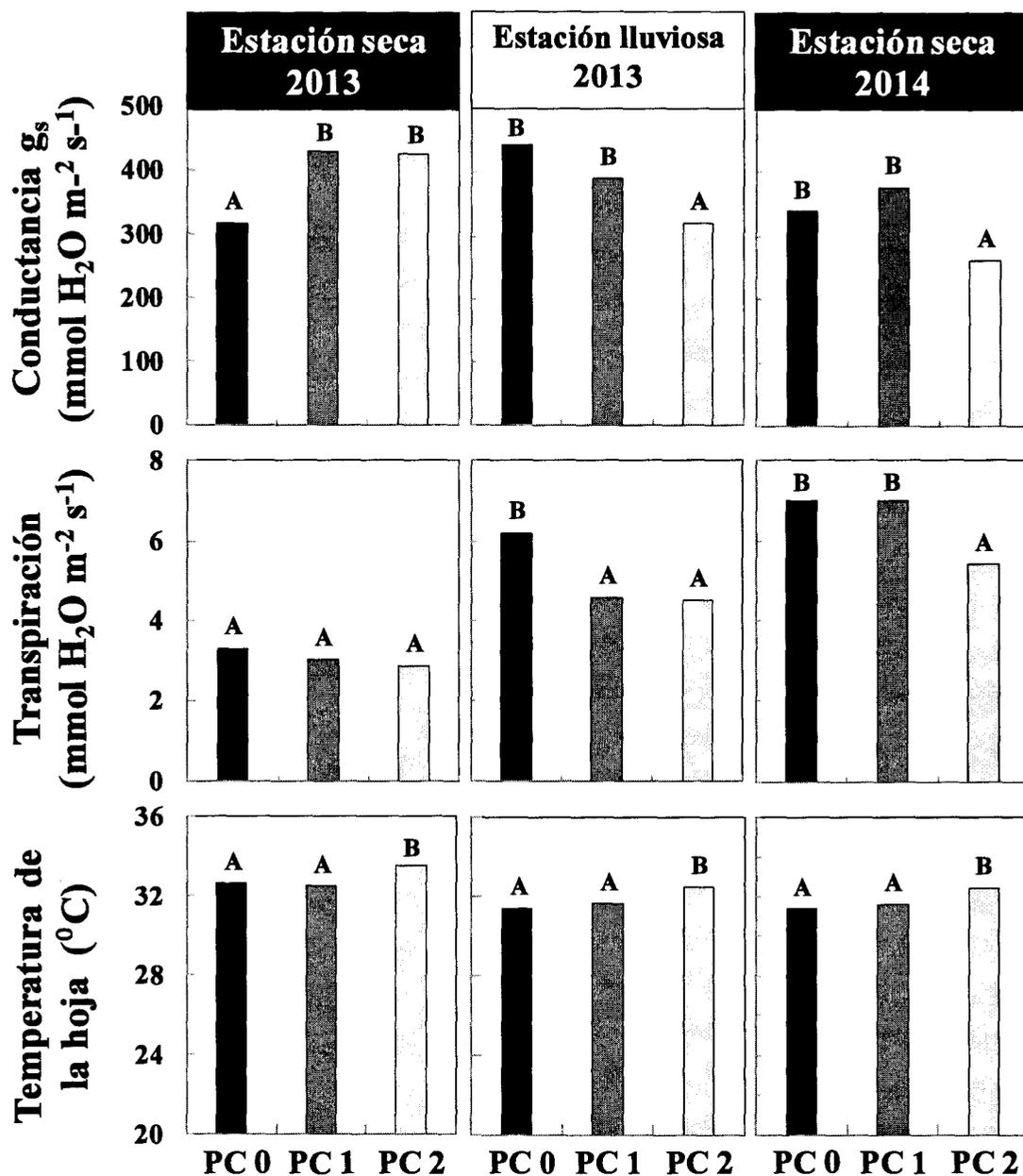


**Figura 9.** Potencial hídrico de las hojas ( $\Psi_H$ ) No. 1 y 9 en las tres categorías de severidad de PC evaluadas en palmas del clon Tornado, en la mañana (5:00-6:00 am) y la tarde (11:00-1:00 pm) de las estaciones: seca 2013 (febrero-marzo), lluviosa del año 2013 (setiembre-octubre) y seca del año 2014 (marzo) en el Pacífico sur de Costa Rica. La comparación múltiple de todos los pares de medias en el análisis de la varianza, fue realizada utilizando la prueba de Dunnett. Los resultados son las medias de 250 muestras por cada estación, donde letras iguales denotan diferencias no significativas con un nivel de significancia de  $P < 0,05$ .

### **Conductancia estomática, transpiración y temperatura de las hojas**

Los datos de intercambio gaseoso demuestran que en la estación seca de 2013 (precipitación de 140 mm/mes), las hojas No. 1, 9 y 17 de las palmas con PC 1 y PC 2 tenían una conductancia estomática significativamente más alta con respecto a las palmas sanas (PC 0) y en el caso de la severidad PC 2 una mayor temperatura de las hojas.

Esta alteración fisiológica se manifestó predominantemente en la estación seca de 2013, mientras que en la estación lluviosa del mismo año y en la seca del 2014, esta tendencia se invirtió en las palmas con PC 2, pues mostraron una menor conductancia estomática y transpiración con respecto a las palmas con PC 0 y PC 1, aunque la temperatura de las hojas fue siempre mayor (Fig. 10).



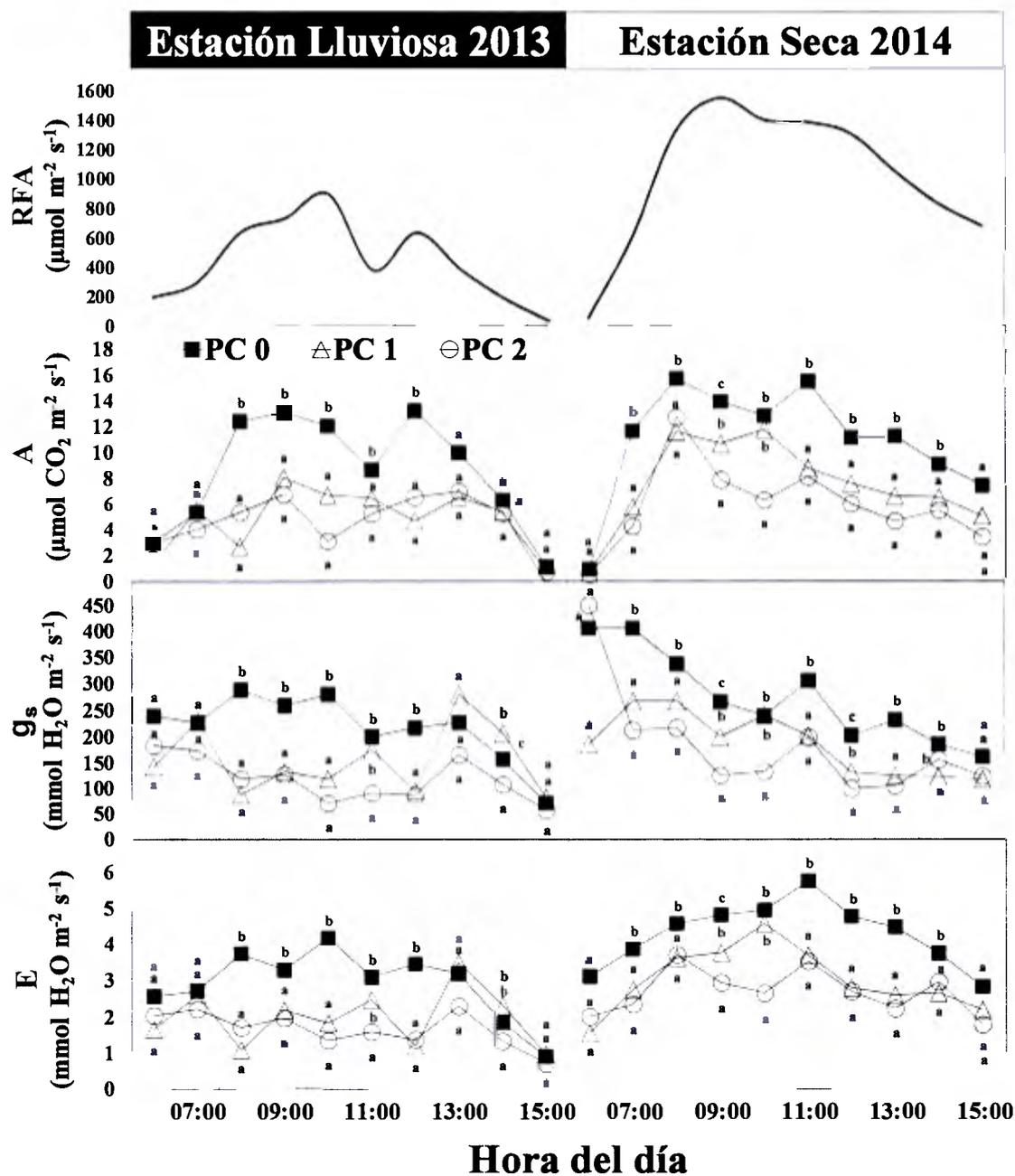
**Figura 10.** Conductancia estomática, transpiración y temperatura de la hojas No. 1, 9 y 17 en las tres categorías de severidad de PC evaluadas en palmas del clon Tornado, en las estaciones: seca 2013 (febrero-marzo), lluviosa del año 2013 (setiembre-octubre) y seca del año 2014 (marzo) en el Pacífico sur de Costa Rica. La comparación múltiple de todos los pares de medias, en el análisis de la varianza, fue realizada utilizando la prueba de DGC. Los resultados son las medias de 70 muestras por cada estación, donde letras iguales denotan diferencias no significativas con un nivel de significancia de  $P < 0,05$ .

## Fotosíntesis

Los cursos diurnos de fotosíntesis fueron evaluados bajo condiciones contrastantes de RFA. Las evaluaciones de la estación seca de 2014 se realizaron bajo condiciones de RFA que duplicaron las de la estación lluviosa de 2013, las cuales se reflejaron en las diferencias de la tasa fotosintética de las palmas de las tres categorías de severidad evaluadas. En la palma aceitera, la máxima actividad fotosintética se asocia con valores de RFA cercanos a  $1150 \mu\text{mol fotonos m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Corley y Tinker, 2003).

La recuperación de las palmas de los tratamientos T3 y T4 fue verificada mediante la medición de la actividad fotosintética a lo largo del día. En la estación lluviosa del año 2013 la tasa fotosintética de las palmas sanas (PC 0), alcanzó los  $14 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  durante la mayor parte del día, mientras que las palmas de las severidades PC 1 y PC 2 apenas superaron los  $7 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Fig. 11). La transpiración de las palmas sanas fue significativamente mayor que la de las otras severidades de PC, indicando una intensa actividad fisiológica y capacidad de extracción de agua del suelo.

Igualmente, en la estación seca de 2014, la mayor actividad fisiológica se presentó en las palmas sanas de los tratamientos T3 y T4 que tuvieron una tasa fotosintética de  $17 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , mientras que en las palmas de las categorías PC 1 y PC 2 ésta alcanzó un máximo de  $13 \mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$  (Fig. 11)



**Figura 11.** Radiación fotosintéticamente activa (RFA), fotosíntesis neta (A), conductancia estomática ( $g_s$ ) y transpiración (E) de la hoja No. 9 en las tres categorías de severidad de PC evaluadas en palmas del clon Tornado, en las estaciones: lluviosa 2013 (setiembre) y seca 2014 (febrero) en el Pacífico sur de Costa Rica. La comparación múltiple de todos los pares de medias, en el análisis de la varianza, fue realizada utilizando la prueba de DGC. Los resultados son las medias de 24 muestras por hora por severidad de PC por cada estación, donde letras iguales denotan diferencias no significativas con un nivel de significancia de  $P < 0,05$ .

### Nutrientes en las hojas

Las palmas recuperadas de la PC, correspondientes a los tratamientos T3 y T4 presentaron contenidos óptimos de los macro y micronutrientes, estas presentaron un mayor contenido de N, Fe, S y K y un menor contenido de B y Ca con respecto al T5 (testigo absoluto) (Cuadro 7). En los ocho tratamientos aplicados la relación Fe/Mn presentó un claro desbalance 1:2.

**Cuadro 7.** Contenido de nutrientes en la hoja No. 9 de palmas del clon Tornado de acuerdo con la severidad inicial de PC (noviembre de 2012) y el tratamiento de recuperación implementado en la estación lluviosa de 2014 (mayo). Cada valor es el promedio del análisis de folíolos basales, mediales y distales tomados de forma compuesta en cinco palmas de cada tratamiento.

PC	Tratamiento	Macronutrientes (%)						Micronutrientes (mg/Kg)				
		N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
<b>0</b>	<b>T1</b>	2,93	0,16	0,77	0,21	1,05	0,17	72	7	13	143	18
	<b>T2</b>	2,76	0,16	0,84	0,22	0,95	0,16	59	6	14	112	29
	<b>T3</b>	2,93	0,16	0,72	0,20	0,97	0,15	58	7	15	87	15
<b>1</b>	<b>T4</b>	2,79	0,17	0,73	0,22	0,97	0,15	58	7	15	124	20
	<b>T5</b>	2,64	0,18	0,75	0,23	0,96	0,15	57	6	15	81	23
<b>2</b>	<b>T3</b>	2,90	0,18	0,68	0,19	1,22	0,15	65	7	15	88	16
	<b>T4</b>	2,73	0,15	0,64	0,18	1,08	0,14	57	6	12	146	16
	<b>T5</b>	2,71	0,16	0,68	0,22	0,97	0,14	53	7	15	125	18

### **Producción de fruta y características del racimo**

La efectividad de la recuperación inducida por las terapias aplicadas y reflejada en la mayor actividad fotosintética, crecimiento y recuperación de los síntomas de PC, también se reflejó en diferencias en el rendimiento, siendo la producción de racimos del tratamiento T4 de 12,4 kg mayor ( $P < 0,05$ ) con respecto al testigo absoluto (Cuadro 8).

El peso y las características del racimo, el porcentaje de fruto total en el racimo (F/B), y el porcentaje de mesocarpio en el fruto (M/F) no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos T4 y T5, pero el contenido de aceite en el mesocarpio del T4 fue significativamente más alto con una diferencia del 7% con respecto al testigo (Cuadro 8).

**Cuadro 8.** Rendimiento expresado en términos de la producción de fruta fresca y características de la composición del racimo en función de la severidad inicial de PC (noviembre de 2012) y el tratamiento de recuperación implementado en palmas del clon Tornado. Los resultados son las medias de 10 muestras por tratamiento, donde se realizó la comparación de medias entre los tratamientos T1 y T2 y T4 y T5 con la prueba de *t*, a un nivel de significancia de  $P < 0,05$ .

<b>PC</b>	<b>Tratamiento</b>	<b>NRC</b>	<b>KGS</b>	<b>PR</b>	<b>F/B</b>	<b>M/F</b>	<b>A/M</b>	<b>A/R</b>
<b>0</b>	<b>T1</b>	28,9 <b>A</b>	80,0 <b>A</b>	3,3	68,3	72,6	33,9	17,1 <b>A</b>
	<b>T2</b>	30,4 <b>A</b>	74,0 <b>A</b>	4,1	66,9	74,1	29,4	14,6 <b>B</b>
	<b>T3</b>	ABLACIÓN						
<b>1</b>	<b>T4</b>	35,6 <b>A</b>	74,0 <b>A</b>	4,4	65,0	72,6	32,1	15,4 <b>A</b>
	<b>T5</b>	23,0 <b>B</b>	59,0 <b>B</b>	4,0	66,7	71,4	27,2	12,8 <b>B</b>
	<b>T3</b>	ABLACIÓN						
<b>2</b>	<b>T4</b>	32,1 <b>A</b>	70,0 <b>A</b>	4,4	68,9	72,8	30,9	15,4 <b>A</b>
	<b>T5</b>	20,1 <b>B</b>	49,0 <b>B</b>	4,1	68,6	70,5	23,9	11,6 <b>B</b>

NRC = número de racimos/palma; KGS = producción total de fruta fresca, kg/palma (1.5 años de evaluación); PR = peso promedio del racimo ; F/B = % de fruto total en el racimo; M/F = % de mesocarpio en el fruto; A/M = % de aceite en el mesocarpio, A/R = % de aceite en el racimo

## DISCUSIÓN

En años más recientes (2009 al 2014), el clima del Pacífico Sur de Costa Rica se ha caracterizado por presentar periodos prolongados de precipitación, seguidos por periodos secos bien definidos, que representan la alternancia de eventos de La Niña y El Niño, siendo el efecto acumulativo perjudicial para el sistema radical de la palma aceitera. Estos patrones de precipitación han influenciado en gran medida la aparición y la dinámica de la PC (Torres, 2013).

En el sitio de estudio los primeros casos de PC se presentaron a finales del año 2012, precedidos por un periodo muy lluvioso que se extendió de mayo a noviembre, con una precipitación mensual promedio de 390 mm, seguido por una reducción notable de las lluvias en los meses de enero a marzo de 2013 (estación seca), cuando la precipitación promedio fue de 35 mm por mes. De mayo a noviembre de 2013 se presentó nuevamente un periodo prolongado de lluvias con una precipitación mensual de 445 mm que disparó la incidencia y aumentó la severidad de PC en todo el lote. Tal y como lo estableció Torres (2013), existe una relación entre la ocurrencia de la PC con periodos continuos de alta precipitación alternados por episodios marcados de menor precipitación, asociando la PC con años muy lluviosos como La Niña, que causan un rápido y severo deterioro del sistema radical, seguidos por años como El Niño con periodos secos más pronunciados.

El drenaje en este lote consistió de un sistema de canales cuaternarios, terciarios y secundarios que han propiciado condiciones de drenaje subsuperficiales relativamente buenas en toda el área. De tal manera, el patrón de dispersión de la PC, se asoció en mayor medida con las condiciones particulares del micro-relieve que influenciaron el drenaje superficial del lote. La PC se inició en focos discretos en los sectores donde la rodaja de las palmas permaneció saturada después de los eventos de alta precipitación, especialmente en la zona baja del lote, donde la pendiente era fuertemente ondulada, incrementándose notablemente la humedad volumétrica del suelo, lo que provocó que algunas de las palmas sufrieran de los síntomas más severos de PC.

La episaturación (elevada saturación de humedad en la superficie del suelo) en la zona baja del lote ocurrió debido a que el escurrimiento superficial del agua fue alto y los

excesos se acumularon en las depresiones del terreno, donde el drenaje superficial estuvo limitado por la compactación y la pérdida de estructura que han sufrido estos suelos debido a la mecanización y el laboreo intensivo. Este problema de saturación del suelo se intensificó en el horizonte Ap, pues la alta densidad aparente, la conductividad hidráulica baja y la pérdida del espacio aéreo, limitaron el movimiento del agua de infiltración en dirección vertical.

Cuando el agua ocupa gran parte o todo el espacio poroso del suelo, disminuye la difusión del oxígeno requerido para los procesos de respiración celular que aportan la energía metabólica requerida para que el agua y los nutrientes sean absorbidos por las raíces a través de la corriente transpiratoria, afectándose en forma negativa el crecimiento, la productividad de las palmas y en casos más severos la aparición de la PC por la muerte de las raíces (Torres, 2013).

La asociación entre los periodos prolongados de alta precipitación y las propiedades físicas del suelo que limitaron el drenaje del agua y la consecuente ocurrencia de PC por la pérdida de raíces, coincide con las observaciones de Durán y Ortiz (1995) y Torres (2013) quienes determinaron que en el Pacífico Sur de Costa Rica, el exceso de agua y la deficiencia estacional de oxígeno en el suelo limitan la productividad de la palma aceitera en las áreas con suelos pobremente drenados.

Como resultado del estrés que estaban sufriendo las palmas afectadas con PC se presentaron comportamientos anormales en su fisiología. En la estación seca de 2013, las palmas con síntomas iniciales y leves de PC mostraron un incremento transitorio de la conductancia estomática y la temperatura de la hoja, pero ante la reducida densidad de raíces que tenían las palmas, disminuyó su capacidad de absorber agua y minerales del suelo en cantidades suficientes, lo que eventualmente generó un desbalance hídrico y energético que se manifestó en la estación lluviosa de 2013 (mayo a noviembre, precipitación promedio: 450 mm) y aún más en la seca de 2014 (enero a abril, precipitación promedio: 140 mm), cuando las palmas con PC I presentaron una menor capacidad de regulación del potencial hídrico de las hojas, siendo incapaces de responder a la alta demanda evaporativa de la atmósfera, probablemente como un mecanismo para prevenir la pérdida excesiva de agua durante la fotosíntesis, la cual disminuyó significativamente. Lo

anterior difiere de lo observado por Moreno et al (2013) quienes concluyeron que los estados iniciales de la PC (PC 1) no afectan significativamente la conductancia estomática, la transpiración, la fotosíntesis y el metabolismo de la palma aceitera.

La intensificación de los síntomas de PC durante la estación lluviosa del año 2013, probablemente se debió al descontrol estomático provocado por la muerte de las raíces, limitando las respuestas de las palmas, reduciéndose su potencial hídrico y la fotosíntesis neta. Esta condición resultó particularmente perjudicial en la zona baja del lote, donde la tabla de agua constantemente saturó la zona radical, afectando negativamente a las raíces que se concentraban en los primeros 30 cm de la superficie del suelo, lo que podría estar relacionado con la disminución de señales químicas por carecer de un sistema radical funcional (Davies y Zhang, 1991).

Los desbalances fisiológicos que sufrieron las palmas desencadenaron una serie de síntomas dinámicos y progresivos. En el estado inicial del trastorno (PC 1) las palmas presentaron clorosis progresiva en las hojas más jóvenes, lo que puede estar asociado con la deficiencia de N y Fe que afectó la formación de clorofila (Torres, 2013).

En los estados más avanzados (PC 2) ocurrió el secamiento de los folíolos basales y la pudrición de las bases peciolares de las hojas intermedias. En ausencia de un crecimiento activo y una menor actividad fisiológica, el B y Ca se acumularon en las hojas nuevas de esta categoría de palmas enfermas. El B y Ca son elementos poco móviles involucrados en la síntesis de lignina y en la formación de la pared celular. Al ocurrir la acumulación de estos elementos en las hojas, se dio un menor movimiento de los mismos hacia otros órganos, que hizo los tejidos más susceptibles al ataque de patógenos oportunistas, provocando la pudrición de las bases peciolares y la quebradura de las hojas. Estos síntomas son descritos por primera vez para el clon Tornado en el cuadro 9. Los resultados antes mencionados coinciden con los obtenidos por Torres (2013) en donde se pudo asociar el deterioro del sistema radical de las palmas con PC con patrones anormales de absorción y translocación de nutrimentos que provocaron los síntomas característicos de la PC.

**Cuadro 9.** Descripción de los síntomas asociados a la PC en el clon Tornado.

SINTOMATOLOGÍA	DESCRIPCIÓN
	<p>La clorosis intervenal se inicia más frecuentemente en la sección distal de las hojas jóvenes y se extiende hacia la base del raquis, también ocurre la clorosis progresiva de los folíolos basales extendiéndose hacia la punta de las hojas en menor grado.</p>
	<p>Dentro de los folíolos, la clorosis se inicia en la zona distal y se extiende hacia la base, seguida por necrosis de los tejidos en la misma dirección, de manera que en la totalidad de la hoja, la clorosis se observa en los bordes, ya sea que ésta se inicie en la parte distal (predominantemente) o basal del raquis.</p>
	<p>Las palmas presentan quebraduras severas en el peciolo de las hojas ocasionadas por peciolitis (pudriciones de estos tejidos). Los doblamientos o torceduras del raquis son leves y las quebraduras ocurren en el peciolo. Las plantas pierden hasta 30-40% de las hojas.</p>
	<p>Los frutos no se llenan y por el contrario se deshidratan, tomando la apariencia de racimos fibrosos y deshidratados.</p>

Con la aplicación de las terapias de recuperación, las palmas mostraron una recuperación morfológica y fisiológica completa de los síntomas iniciales (PC 1) y leves (PC 2) de la PC en un periodo de 18 meses. La recuperación de los síntomas característicos de la PC estuvo precedida por el incremento de la densidad de raíces, lo cual permitió recuperar el control estomático, incrementar el potencial hídrico de las hojas y la actividad fotosintética, lo que permitió incrementar el crecimiento vegetativo, la producción de racimos, la acumulación de aceite y la tolerancia al estrés biótico y abiótico (Kananam et al. 2011).

El acondicionamiento del suelo a través de su mejoramiento integral tuvo como principal objetivo la recuperación a corto plazo del sistema radical, considerando las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo. Esto se logró mejorando el drenaje superficial de la rodaja y la aplicación de compost de alta calidad, propiciando un ambiente favorable para el crecimiento de las raíces. El drenaje superficial deficiente del sitio fue corregido a finales de la estación lluviosa del año 2013 mediante la implementación de canales de drenaje diseñados al microrelieve de cada palma. Esto permitió la evacuación inmediata del agua de escorrentía hacia la red de canales cuaternarios del lote. De tal manera durante los meses de abril a junio de la estación lluviosa del año 2014, aunque la precipitación mensual fue de 400 mm, la humedad volumétrica del lote se mantuvo en 33%.

Mediante la incorporación del compost de racimos vacíos de palma aceitera se corrigieron algunas de las deficiencias fisicoquímicas del suelo, por ejemplo, la recuperación de los agregados del suelo, la disminución de la acidez, el incremento de la CICE y al mismo tiempo se alcanzó una mayor disponibilidad de los macronutrientes Mg, K y P y los micronutrientes Fe y Zn, así como el incremento de carbono (Mohammad et al. 2012), lo cual permitió mejorar la relación C/N e incrementar diversidad microbiana.

Esta condición más favorable de humedad en el suelo en conjunto con las aplicaciones de compost de fibra de racimos vacíos, permitieron corregir en un periodo corto la mayoría de los desbalances de los macro y micronutrientes en el suelo y en las hojas nuevas de las palmas. El compost tiene la capacidad de acomplejar parte de los

elementos nutricionales del suelo, lo cual le permite actuar como un fertilizante de lenta liberación. Esto favoreció el incremento de la densidad de raíces, probablemente porque al permanecer el sustrato liberando los nutrientes por más tiempo, se extendió la longevidad de las raíces activas, reduciéndose la inversión de energía en la producción de nuevas raíces (Albertazzi, 2008), a la vez que favoreció la restauración de una microbiología saludable, mediante la degradación lenta de sus componentes, lo cual posibilitó el incremento de la concentración de microorganismos benéficos y disminuyendo a los potencialmente patogénicos. La diversidad de microorganismos benéficos incluyó actinomicetes, firmicutes, lactobacilos, bacterias tróficas, hongos micorrízicos y microorganismos fijadores de nitrógeno entre otros, que propiciaron la activación de retroalimentaciones positivas suelo-planta (Bever et al. 2012; Mangan et al. 2010).

En general las enmiendas que se aplicaron al suelo tuvieron un efecto estimulante sobre el sistema radical de la palma aceitera, que se reflejó en el incremento significativo de la densidad raíces de las palmas recuperadas en mayo de 2014. Este resultado coincide con el obtenido por Albertazzi (2008) quien determinó un incremento en la cantidad de raíces finas de palmas afectadas por PC poco tiempo después de la aplicación de compost de racimos vacíos de palma aceitera al suelo. Esto contrasta con el suelo del tratamiento testigo, donde predominaron los microorganismos potencialmente patogénicos, que parecen tener una mayor tolerancia a la anaerobiosis. Esta capacidad para funcionar como anaeróbicos facultativos les permitió sobrevivir los constantes eventos de precipitación que provocaron una disminución del contenido de oxígeno en el suelo, mientras que los microorganismos benéficos, aeróbicos obligados en su mayoría, parecen estar menos adaptados a la falta de oxígeno en el suelo.

La efectividad de las terapias de recuperación aplicadas en la parte aérea (cirugía del tejido enfermo, ablación y la aplicación de sustancias al follaje) quedaron demostradas con la sanidad que mostraron las palmas y por su efecto positivo sobre el crecimiento y la producción de racimos.

La ablación es una práctica agrícola poco explorada en la palma aceitera (Corley y Breure, 1992; Legros et al. 2009b). Con la ablación de los racimos se modificó el patrón de distribución de los asimilados, eliminando del todo su asignación a la producción de estructuras reproductivas, para que los recursos nutricionales fueran utilizados en el crecimiento vegetativo. Mediante la aplicación de esta práctica, las palmas mostraron un incremento significativo de la altura del tronco al finalizar este trabajo y un incremento temporal de la producción de hojas, P<sub>x</sub>S y la longitud del raquis, durante la estación seca 2013. No obstante, esta práctica no tuvo efecto alguno sobre la densidad de raíces, lo cual indica que la palma aceitera tiene la capacidad de almacenar cantidades importantes de sustancia de reserva en el tronco con el objetivo de amortiguar las deficiencias fotosintéticas que pudieran ocurrir bajo condiciones climáticas desfavorables, y que no ocurre un transporte significativo de estas sustancias hacia las raíces (Basri et al. 2004; Legros et al. 2009b; Milaet-Serra et al. 2006).

Las pudriciones en la parte aérea del clon Tornado se manifestaron principalmente en las bases peciolares y con poca frecuencia ocurrió el secamiento de la flecha (Cuadro 9). De tal manera, con la cirugía temprana se removió el tejido afectado en la parte externa de las bases peciolares (“peciolitis”), aplicándose sobre las heridas producidas el sellador Agrofíxer. Esta práctica tuvo un efecto importante sobre la recuperación de las palmas con PC, pues permitió eliminar el tejido deteriorado, evitando la entrada de los hongos y bacterias oportunistas y la invasión por insectos, extendiendo la longevidad de las hojas fisiológicamente más activas.

En las palmas que no fueron tratadas con esta terapia (testigo) se produjeron lesiones que redujeron el área de los tejidos conductores (xilema y floema), predisponiendo el debilitamiento, la clorosis y el quebramiento de hojas con alto potencial fotosintético (hojas de la 4 a 9), afectando severamente el mecanismo fisiológico de las palmas, retrasando la recuperación de los síntomas de PC. Ayres (1984) y Yarwood (1976) señalan que la baja disponibilidad de luz y los factores asociados, como el exceso de agua, bajas temperaturas relativas y deficiencias de carbohidratos no estructurales, de ocurrencia frecuente en muchas zonas productoras de palma aceitera, es la principal causa abiótica de la predisposición a las enfermedades.

La predisposición puede causar susceptibilidad de las palmas a microorganismos oportunistas (Ayres 1984), algunos de los cuales pueden habitar como endófitos de las palmas aceiteras sanas (*Pseudomonas*, *Fusarium*, *Phytium*) (Porras y Bayman, 2011; Zamioudis et al. 2013). Para demostrar concluyentemente estas relaciones, y en coincidencia con Torres (2013), se requiere realizar estudios detallados de los cambios fisiológicos y microbiológicos experimentados por las palmas aceiteras al inicio de la PC. Así el esclarecimiento de la secuencia de los eventos que conducen a la PC necesita estudios controlados para evaluar las respuestas de las raíces y las copas de manera análoga a los "postulados de Köch fisiológicos". Considerando los agentes bióticos asociados con la PC que se mencionan en la literatura (Torres et al 2010; Suwandi y Kondo, 2012), se ha reportado que microbios como *Pseudomonas* sp., endófitos de las raíces de las plantas y promotores del crecimiento y la salud de las mismas (Zamioudis et al. 2013), pueden tornarse patogénicos bajo condiciones de estrés, y liberar toxinas en la corriente de transpiración que inhiben el cierre estomático en las hojas; diversos patógenos bacterianos del follaje liberan efectores en las superficies de las hojas, que interfieren con el funcionamiento estomático e impiden su cierre en respuesta a la infección (Melotto et al. 2008). Por lo tanto y dada la similitud de estos síntomas fisiológicos con los descritos en esta tesis y en Torres (2013) es importante continuar con el examen microbiológico de las palmas afectadas por la PC.

No fue posible relacionar la recuperación de los síntomas de PC con algún cambio significativo en la longitud del raquis, el número de hojas o el PxS, pero sí con el incremento significativo de la densidad de raíces. Lo anterior difiere de lo observado por Albertazzi et al. (2005) y Torres (2013) quienes encontraron un menor número de hojas, largo del raquis y PxS en palmas enfermas con PC. Esto indicaría que la parte aérea de las palmas sufre más el efecto acumulado de la severidad del ataque y lo manifiesta sobre el crecimiento de la copa, la producción de racimos y la acumulación de aceite por un periodo mayor a dos años (Albertazzi et al. 2005). Por consiguiente, para lograr la recuperación de los síntomas de PC, la palma aceitera requiere primero regenerar el sistema radical, lo que posteriormente permitirá la recuperación del crecimiento vegetativo y en última instancia el incrementó de la producción de racimos y acumulación de aceite.

Este comportamiento se debe a que las raíces desempeñan un rol fundamental para el crecimiento y sobrevivencia de las palmas, ya que realizan funciones esenciales como el anclaje, la absorción de agua, nutrimentos y compuestos orgánicos y actividades biosintéticas como la producción de reguladores de crecimiento y vitaminas (Torres, 2013; Jourdan y Rey, 1997; Gutiérrez et al. 2014), algunos de los cuales pueden funcionar como señales radicales.

La mayor longitud de raquis que presentaron las palmas con severidad inicial de PC 2, podría tener su explicación en que la afectación de PC fue precedida con un periodo de crecimiento muy vigoroso y con alta producción de racimos que la palma fue incapaz de sostener como consecuencia del agotamiento estacional de carbohidratos y otros nutrimentos durante la estación lluviosa de 2012, provocando un desbalance fisiológico mayor, lo que resultó en la expresión de los síntomas más severos de PC (Legros et al. 2009b; Milaet-Serra et al. 2006).

Las palmas que no se recuperaron de los síntomas de PC (testigo) presentaron una reducción significativa en el rendimiento y la acumulación de aceite. Se ha determinado que en palmas que sufren de PC, el número de racimos por palma puede ser afectado a partir del momento de la diferenciación floral. Por consiguiente, las diferencias en el número de racimos entre palmas sanas y con PC podrían ser el resultado del aborto (antesis), o falla (pos-antesis) de los racimos. Lo primero se explica por fallos en los procesos de fertilización y embriogénesis, mientras que lo segundo ocurrió por la pérdida de racimos en pleno llenado como consecuencia de la deshidratación del fruto por el bajo potencial hídrico que manifestaron las palmas con PC (Cuadro 9). Los frutos mostraron una necrosis que fue progresando de la punta hacia la base, lo que sugiere la ocurrencia de deficiencias nutricionales de Ca y B y la posible participación de agentes bióticos.

La reducción en el contenido de aceite que acumularon los frutos pudo estar relacionada con la pérdida del brillo característico de los racimos en maduración que se tornaron opacos, indicando un cambio en la síntesis de lípidos y carotenoides.

Las variedades modernas de palma aceitera se caracterizan por producir un alto número de racimos desde los primeros años y en acumular un elevado contenido de aceite en el racimo, lo cual es costoso desde el punto de vista energético de la planta, y significa que la palma puede utilizar menos recursos nutricionales y energéticos para el crecimiento vegetativo, así como la síntesis y el almacenamiento de sustancias de defensa (Rocha et al. 2005) (Fig. 12).



**Figura 12.** La partición de asimilados expresados como los recursos limitados disponibles para el crecimiento de la palma aceitera entre las actividades fisiológicas más importantes (Autoría Gutiérrez, 2014)

En la palma aceitera, la partición de asimilados ocurre entre actividades antagónicas, pero complementarias: el crecimiento vegetativo, el desarrollo reproductivo, el almacenamiento de reservas y las actividades de defensa (Fig. 12). Lo anterior ha provocado que las variedades contemporáneas de palma aceitera, compactas, precoces y de alto rendimiento sean particularmente susceptibles a los estreses ambientales que experimentan a lo largo del sistema continuo suelo-planta-atmósfera, debido a que se ha sacrificado la asignación de recursos al crecimiento vegetativo y a la defensa con el

objetivo de incrementar los rendimientos significativamente. En el caso del Pacífico sur de Costa Rica, ante eventos prolongados de alta precipitación, inclusive los suelos más aptos para el cultivo de la palma aceitera sufren de un desbalance en las propiedades físicas, químicas y microbiológicas, las cuales en conjunto disminuyen el contenido de oxígeno en el suelo y por consiguiente causan la pérdida de las raíces (Torres, 2013), de por sí reducidas como resultado del mejoramiento genético, y de baja prioridad en la jerarquía de los sumideros de la palma aceitera.

Al igual que en previas investigaciones (Albertazzi, 2005; Torres, 2013) los síntomas de PC se incrementaron durante el periodo de alta precipitación (estación lluviosa de 2013) y elevada humedad volumétrica del suelo, las cuales en conjunto provocaron la muerte de las raíces, afectando la absorción de nutrimentos como el nitrógeno y el hierro, que generaron desbalances nutricionales, como en la relación Fe:Mn (Torres, 2013). El problema de la elevada saturación de humedad en el suelo durante los periodos de alta precipitación fue consecuencia de la alta densidad aparente del horizonte superficial Ap, la baja conductividad hidráulica, la pérdida del espacio aéreo y las condiciones particulares del microrelieve en la zona de la rodaja que afectaron el movimiento del agua de escorrentía, provocando que ésta se acumulara en la superficie del suelo, lo cual limitó la disponibilidad de oxígeno para las raíces.

Con el acondicionamiento del suelo, que incluyó la aplicación de compost de racimos vacíos de palma aceitera de alta calidad y la creación de una red de micro-drenajes específicos para cada palma, fue posible disminuir la acidez y la saturación de acidez, se logró aumentar el contenido de Mg, K y la CICE, y la diversidad de microorganismos benéficos en la rizosfera, mientras que el porcentaje de humedad volumétrica se logró mantener bajo durante los meses de alta precipitación de la estación lluviosa de 2014.

Esta mejora de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo favorecieron el incremento significativo de la densidad de raíces, que se puede considerar como requisito para que ocurra la recuperación de la PC en la palma aceitera, ya que las señales químicas que regulan el control estomático de la transpiración y el potencial hídrico de las hojas son producidas por los sistemas radicales funcionales (Davies y Zhang, 1991; Rajagopal et al. 1986).

De igual manera, la aplicación de las cirugías para remover el tejido enfermo tuvo un efecto importante sobre la recuperación de las palmas con PC, pues permitió extender la longevidad de las hojas nuevas (hojas No. 1 a 9), que al recibir las señales químicas del sistema radical recuperado, reactivaron su actividad fisiológica, la cual se reflejó en una mayor actividad fotosintética y fisiológica en general, y en el mejor balance de nutrimentos en las hojas, siendo mayor el contenido de nitrógeno, hierro, azufre y potasio.

Quedó demostrado que la eliminación de los racimos en condiciones agroclimáticas desfavorables favoreció la acumulación de reservas en el tronco, la cual se reflejó en el incremento significativo de la altura del tronco de las palmas con ablación. No obstante, los resultados indican que la ablación debería ser aplicada durante un periodo corto de tiempo, preferiblemente al inicio la estación lluviosa, con el objetivo de dirigir la partición de asimilados hacia el sistema radical en el momento que ocurre la mayor muerte de raíces y no hacia la producción de más hojas o el almacenamiento de más reservas en el tronco. La conservación de cierta proporción de los frutos podría aumentar la efectividad de esta práctica al obligar a que los asimilados sean utilizados en la regeneración de las raíces y no solamente en la producción y elongación de las hojas

El balance nutricional y energético entre los diferentes órganos les permitiría a las palmas enfrentar nuevas condiciones desfavorables, ya sea debido a alteraciones ocurridas en el corto plazo (eventos de alta precipitación y reducida radiación fotosintéticamente activa durante unas horas), mediano plazo (periodos temporales de ausencia o exceso de precipitación y deficiencia estacional de oxígeno en el suelo), y en el largo plazo (cambios en las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo).

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados indican que la PC es un trastorno dinámico, es decir, las palmas pueden agravarse, recuperarse e incluso recaer a través del tiempo en función de las condiciones climáticas, lo que afectó la fisiología y el desarrollo de las palmas, y se inició con condiciones ambientales desfavorables para el sistema radical. En ausencia de un sistema radical funcional capaz de absorber el agua y minerales del suelo necesarios para satisfacer las necesidades de la planta, las hojas de las palmas con PC presentaron reducción del potencial hídrico, pérdida del control estomático y de la transpiración y sufrieron del incremento de la temperatura de las hojas. Todos estos trastornos fisiológicos se reflejaron sobre la baja en la actividad fotosintética, la menor producción de fruta y la baja acumulación de aceite en el racimo.

En el presente trabajo se demostró de manera contundente que la aplicación de prácticas agronómicas enfocadas en la recuperación de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo en conjunto con la cirugía temprana del tejido enfermo y la ablación de las estructuras reproductivas, permitieron la recuperación del sistema radical, el aumento de la altura del tronco, el incremento de las relaciones hídricas, de la fotosíntesis, y lo más importante desde el punto de vista del rendimiento, la producción de fruta fresca y la acumulación de aceite en el racimo.

Mediante la aplicación de estas prácticas agrícolas, las palmas con síntomas iniciales y leves de PC se recuperaron en un periodo menor a 18 meses, lo cual es relevante para la economía del Pacífico de Costa Rica, donde más de 1,800 familias dependen directamente de esta actividad. No obstante, antes de que estas prácticas puedan ser difundidas entre los productores de palma aceitera, es necesario considerar lo siguiente:

- Los tratamientos de recuperación fueron aplicados sobre un clon comercial, lo cual significa que estas prácticas deben ser evaluadas en diferentes variedades, antes de que pueda generalizarse su aplicación en las plantaciones comerciales de palma aceitera, ya que la variabilidad genética entre individuos podría afectar la capacidad de recuperación de las palmas. Sin embargo, para corroborar este punto, en la actualidad, las terapias de recuperación se encuentran bajo evaluación en un lote comercial de 15

has localizado en el Pacífico sur de Costa Rica, el cual fue sembrado con una variedad precoz de 20 meses de edad que está mostrando síntomas iniciales y leves de PC.

- El otro aspecto que debe ser tomado en cuenta a la hora de aplicar las terapias de recuperación es la edad. Las terapias se aplicaron sobre la plantación joven del clon Tornado (30 meses de edad), momento en que la altura del tronco era menor a 1,5 m, facilitándose las labores de ablación y la cirugía temprana de los tejidos enfermos. A partir de los 72 meses de edad (plantación adulta), la altura del tronco de las variedades modernas mide en promedio 4,5 m, lo cual podría dificultar la detección temprana de los síntomas iniciales y leves de PC y las labores del personal encargado de aplicar las terapias de recuperación.
- En plantaciones jóvenes y adultas de palma aceitera es común encontrar palmas con estados más avanzados de la PC: en el estado de desarrollo PC 3 ocurre el secamiento de la hoja flecha, mientras que en la severidad PC 4 se acumulan cuatro o más flechas secas, lo que puede formar un “cráter” en el centro de la palma. Estos estados avanzados de la PC pueden ser prevenidos si son detectados a tiempo. En este sentido, la guía con la descripción de los síntomas de PC utilizada en este estudio (Cuadros 1 y 9) puede ser de utilidad en la identificación de los síntomas iniciales de PC.

Tomando en cuenta lo anterior, y de acuerdo con la experiencia generada en el presente trabajo, las palmas aceiteras con síntomas iniciales y leves de PC se pueden recuperar mediante la aplicación de las siguientes prácticas agronómicas:

1. Recuperación del sistema radical a través del mejoramiento de las propiedades físicas, químicas y microbiológicas del suelo (Cuadro 3).
2. Cirugía temprana de los tejidos enfermos con el objetivo de extender la longevidad de las hojas fotosintética activas el tejido seco o con pudrición de la parte externa de las bases peciolares debe ser removido (Cuadro 3).
3. Aplicación de agroquímicos al follaje con la finalidad de mejorar las defensas de las palmas, a través de la absorción directa de las sustancias por las hojas (Cuadro 3).
4. Ablación de estructuras reproductivas, la cual se recomienda realizar mediante la remoción de los 12 racimos más próximos a madurar, para favorecer la translocación de fotoasimilados y nutrimentos hacia las raíces y el tronco.

**LITERATURA CITADA**

- 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, 28: 21-41. ASD Oil Palm Papers, 15: 8-28.
- Albertazzi, H. 2008. Desarrollo radical y aéreo en palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.) joven sembrada en sitios con prevalencia de pudriciones del cogollo. Tesis magíster en scientiae de la Universidad de Costa Rica. TFG 29206. 120 p.
- Alvarado, A; Sterling, F. 1998. Variación estacional en la tasa de extracción de aceite en palma aceitera. ASD Oil Palm Papers, 17: 20-30.
- Ayres, P. 1984. The interaction between environmental stress injury and biotic disease physiology. Annu. Rev. Phytopathol. 22:53-75.
- Baharuddin, A; Wakisaka, M; Shirai, Y; ABD-Aziz, S; Abdul Rahman, N; Hassan, M. 2008. Co-composting of empty fruit bunches and partially treated palm oil mill effluents in pilot scale. International Journal of Agricultural Research, 4(2): 69-78.
- Basri, M; Siti Nor Akmar, A; Henson, I. 2004. Oil palm: Achievements and potential. Plant Production Science 8(3): 288-297.
- Bever, J; Platt, T; Morton, E. 2012. Microbial population and community dynamics on plant roots and their feedbacks on plant communities. Annu. Rev. Microbiol. 66: 265-283.
- CANAPALMA. 2011. Información sobre el cultivo de la palma aceitera. Cámara Nacional de Productores de Palma. Puntarenas, Costa Rica. 39p.
- CENIPALMA. 2011. Plan de erradicación contra la PC en Tumaco. Bogotá, Colombia. Boletín Fedepalma y palmicultores. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, ICA. 1 p.
- Chinchilla, C. 2008. Las muchas caras de las pudriciones del cogollo y flecha en palma aceitera y la importancia de un enfoque práctico para su manejo. ASD Oil Palm Papers, 32: 1-25.
- Chinchilla, C. 2010. No hay evidencia de que exista relación alguna entre la incidencia y severidad de las pudriciones del cogollo en palma aceitera y el origen comercial de las variedades plantadas en el pasado en América Tropical. ASD Oil Palm Papers, 35: 13-22.
- Chinchilla, C; Durán, N. 1998. Manejo de problemas fitosanitarios en palma aceitera: una perspectiva agronómica. Palmas, Colombia. 19 (número especial): 242-256.

- Corley, R; Hardon, J; Tang, Y. 1971. Analysis of growth of the oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.). Estimation of growth parameters and application in breeding. *Euphytica* 20:307-315.
- Corley, R; Breure, C. 1992. Fruiting activity, growth and yield of oil palm. I. Effects of fruit removal. *Expl Agric.* 28: 99-109.
- Corley, R; Tinker, P. 2003. *The Oil Palm*. 4 ed. Oxford, Blackwell Science. 562 p.
- Davies, W; Zhang, 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 42: 55-76.
- Drenth, A. 2012. *Phytophthora palmivora*, The cause of bud rot in oil palm. 17th International Oil Palm Conference and Expopalma. 25th to 28th September 2012. 200p.
- Durán, N; Ortiz, R. 1995. Efecto de algunas propiedades físicas del suelo y la precipitación sobre la producción de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*) en Centroamérica. *Agronomía Mesoamericana*, 6: 7-14.
- Guest, D. 2012. Management of oil palm bud rot: Insights from other Tree Crops. 17th International Oil Palm Conference and Expopalma. 25th to 28th September 2012. 200p.
- Gutiérrez, M; Torres, J; Araya, J. 2014. Uso de Whinrizo en la cuantificación de raíces y su aplicación en palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Agronomía Mesoamericana*, 25(1): 01-08.
- Henson, I; Harun, M. 2005. The influence of climatic conditions on gas and energy exchanges above a young oil palm stand in North Kedah, Malaysia. *Journal of Oil Palm Research*, 17: 73-91.
- Jourdan, C; Rey, H. 1997. Architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. *Plant and Soil* 189: 33-48.
- Kananam, W; Tachapattaworakul, T; Suksaroj, C. 2011. Biochemical changes during oil palm (*Elaeis guineensis*) empty fruit bunches composting with decanter sludge and chicken manure. *Science Asia*, 37: 17-23.
- Legros, S; Mialet-Serra, I; Caliman, J; Siregar, F. Clement-Vidal, A. D; Dingkuhn. 2009a. Phenology and growth adjustments of oil palm (*Elaeis guineensis*) to photoperiod and climate variability. *Annals of Botany*, 104: 1171-1182.

- Legros, S; Mialet-Serra, I; Caliman, J; Siregar, F. Clement-Vidal, A; Fabre, D; Dingkuhn, M. 2009b. Phenology, growth and physiological adjustments of oil palm (*Elaeis guineensis*) to sink limitation induced by fruit pruning. *Annals of Botany*, 104: 1183–1194.
- Mangan, A; Schnitzer, S; Herre, E; Mack, K; Valencia, M. 2010. Negative plant–soil feedback predicts tree-species relative abundance in a tropical forest. *Nature*, 466: 752-756.
- Melotto, M; Underwood, W; Yang, S. 2008. Role of stomata in plant innate immunity and foliar bacterial diseases. *Annu. Rev. Phytopathol.* 46:101-122.
- Milaet-Serra, I; Caliman, J; Clement-Vidal, A; Rounsard, O; Sonderegger, N; Legros, S; Siregar, F; Noel, C; Prades, A; Jourdan, C; Widiastuti, L; Labouisse, J; Croisetu, M; Fourgerolles, K; Sayag, S; Escoute, J; Verdeil, J; Davrieux, F; Deveau, A; Dingkuhn, M. 2006. The transitory carbon reserves in two palms: The coconut and the oil palms. *CIRAD: Proceedings – Final meeting of ATP-Reserves*, 11: 39-50.
- Mohammad, N; Zahangir, M; Kabbashi, N; Ahsan, A. 2012. Effective composting of oil palm industrial waste by filamentous fungi: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 58: 69-78.
- Moreno, A; Camperos, J; Avila, R; Romero, H. 2013. Biochemical and physiological responses of oil palm to bud rot caused by *Phytophthora palmivora*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 70: 246–251.
- Porras, A; Bayman, P. 2011. Hidden fungi, emergent properties. *Endophytes and microbiomes. Annu. Rev. Phytopathol.* 49: 291-315.
- Rajagopal, V; Patil, D; Sumathykuttyamma, B. 1986. Abnormal stomatal opening in coconuts palms affected with rot wilt disease. *Journal of Experimental Botany* 37:1398-1405.
- Rocha, P; Mendoza, C; Cayón, C. 2005. Application of polyamines in oil palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) stops advance of but rot disease. *Journal of Oil Palm Research*. 17: 176-174.
- Roldán, J; Albaladejob, J; Thornes, J. 1996. Aggregate stability changes in a semiarid soil after treatment with different organic amendments. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 10(2): 139-148.
- Sarria, G. 2008. *Phytophthora* sp. es el responsable de las lesiones iniciales de la pudrición del cogollo (PC) de la palma de aceite en Colombia. *Revista Palmas*. 29: 31-41.

- Schoeneberger, P; Wysocki, D; Benham, E; Broderson, W. (editors). 2002. Field book for describing and sampling soils, Version 2.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE. 218 p.
- Segura, M; Ramírez, C; Chinchilla, C; Torres, R. 2001. Uso de dos bioensayos para estimar el efecto residual y el valor nutricional de un composte hecho de la fibra de racimos vacíos de la palma aceitera (*Elaeis guineensis*, Jacq). ASD Oil Palm Papers, 22: 12-16.
- Suwandi, A; Kondo, N. 2012. Common spear rot of oil palm in Indonesia. Plant Disease. 96: 537-543.
- Torres, J. 2013. Caracterización morfo-fisiológica de palmas aceiteras (*Elaeis guineensis* Jacq.) afectadas por la pudrición del cogollo (PC) en Costa Rica. Tesis de Licenciatura de la Universidad de Costa Rica. TFG 36713. 73 p.
- Torres, J; Gutiérrez, M; Chinchilla, C; Mata, R. 2014. Características del suelo, desarrollo radical e incidencia de PC (pudrición del cogollo) en palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq.). ASD Oil Palm Papers 43: 1-11.
- Torres, G; Sarria, G; Varon, F. 2010. First report of bud rot caused by *Phytophthora palmivora* on african oil palm in Colombia. Plant Disease (Disease Notes) 94: 1163-1164.
- Tranbarger, J; Dussert, S; Joe, T; Argout, X Summo, M; Champion, A; Cros, C; Omoro, A; Nouy, B; Morcillo, F. 2011. Regulatory mechanisms underlying oil palm fruit mesocarp maturation, ripening, and functional specialization in lipid and carotenoid metabolism. Plant Physiology. 56: 564-584.
- Umaña, C; Chinchilla, C. 1991. Symptomatology associated with water deficit in oil palm. ASD de Costa Rica Technical Bulletin. 3: 1-4.
- Van de Voorde, T; Van der Prutten, W; Bezemer, T. 2012. Soil inoculation method determines the strength of plant-soil interactions. Soil Biology & Biochemistry. 55: 1-6.
- Wood, B; R, Corley. 1991. The energy balance of oil palm cultivations. Journal of Oil Palm Research 17: 11-26.
- Yarwood, C. 1976. Modification of the host response-predisposition. Encyclopedia of Plant Physiology. Vol. 4. Physiological Plant Pathology. Springer-Verlag. 702-718.
- Zamioudis, C; Mastranesti, P; Dhonukshe, P; Blilou, I; Corné, P. 2013. Unraveling root developmental programs initiated by beneficial *Pseudomonas* spp. Bacteria. Plant Physiology. 162:304-318.