



GUARAPO

(MAC2/4.6d/230)





*Estudio sobre crecimiento radicular de
especies propias de un palmeral
natural o seminatural*



GUARAPO (MAC2/4.6d/230)

TÍTULO: ESTUDIO SOBRE CRECIMIENTO RADICULAR DE ESPECIES PROPIAS DE UN PALMERAL NATURAL O SEMINATURAL

1. Introducción.....	2
2. Objetivos.....	4
3. Diseño experimental	
3.1. Experimento 1. Fertilización y riego	5
3.2. Experimento 2. Direccionalidad del sistema radicular	7
3.3. Experimento 3. Micorrización.....	9
4. Resultados y discusión	
4.1. Experimento 1. Fertilización y riego	11
4.2. Experimento 2. Direccionalidad del sistema radicular	15
4.3. Experimento 3. Micorrización.....	20
5. Conclusiones.....	22
6. Bibliografía.....	23
7. Figuras.....	24

Resumen

Los palmerales de *Phoenix canariensis* constituyen un hábitat de enorme relevancia ambiental y socioeconómica en las Islas Canarias. En las últimas décadas numerosos factores de diversa índole, entre ellos la aridificación del clima y el potencial estrés hídrico asociado, y el abandono de las prácticas agrícolas en los palmerales asilvestrados, amenazan la conservación de estos ecosistemas singulares. Se hace pues necesario, desarrollar estrategias de manejo y medidas de gestión que optimicen el estado funcional de las palmeras y especies acompañantes, y que permitan incrementar la resiliencia y preservación de estas comunidades vegetales frente a los potencialmente adversos escenarios climáticos previstos como consecuencia del calentamiento global. En el presente proyecto de investigación se ha evaluado la eficacia de diferentes técnicas de manejo agrológico en la optimización del desarrollo radicular de la palmera canaria, con el objetivo de favorecer una mayor exploración del sistema edáfico y una mayor eficiencia en la utilización de los recursos de agua y nutrientes, incrementando también las posibilidades de éxito en los procesos de revegetación. Los resultados obtenidos muestran una elevada respuesta positiva de los ejemplares de palmera canaria a los fertilizantes de liberación lenta, con especial repercusión de la fertilización nitrogenada. Por otro lado, la fertilización localizada, tanto con fertilizante químico como orgánico en forma sólida, ha sido capaz de provocar la direccionalidad del sistema radicular de estas plantas, constituyendo un potencial manejo muy prometedor para incrementar la exploración y uso de los recursos edáficos. Por último, la aplicación de inóculos con hongos micorrícicos en combinación con la fertilización mencionada, genera efectos sinérgicos que contribuyen a un mayor desarrollo radicular de la palmera canaria.



1. Introducción

La palmera canaria (*Phoenix canariensis* H. Wildpret) es una de las especies endémicas emblemáticas de las Islas Canarias, constituyendo el símbolo vegetal del Archipiélago. Sus poblaciones (palmerales), que ocupan aproximadamente unas 6600 ha del territorio insular, están sujetas a diversas figuras de protección y conservación que ponen de manifiesto su importancia como hábitats ecológicos singulares (p.ej. hábitats naturales de interés comunitario, de carácter prioritario, por la Red Natura 2000 de la Unión Europea), y también su relevante aprovechamiento tradicional para la obtención de recursos por las comunidades locales (p.ej. fibras para la elaboración de objetos artesanales, productos de la gastronomía regional). Algunos estudios y observaciones realizadas en las últimas décadas alertan de un retroceso significativo en el estado de conservación de algunos palmerales en diferentes zonas del Archipiélago. Este decaimiento podría estar asociado, entre otros factores, al estrés hídrico al que se ven sometidos los ejemplares de palmera canaria como consecuencia de los recurrentes periodos de sequía, olas de calor, eventos de calima, etc. Estos fenómenos, potencialmente vinculados al actual contexto de calentamiento global, podrían exacerbarse en el futuro atendiendo a las previsiones climáticas para las áreas semiáridas y subhúmedas secas donde se desarrollan la mayoría de los palmerales. De forma adicional, particularmente para los palmerales agrícolas asilvestrados (desarrollados en zonas agrícolas abandonadas, normalmente en tierras marginales), el cese del manejo agrológico de estas parcelas ha implicado también la pérdida de los beneficios colaterales asociados a ese manejo (p. ej. la aplicación de riegos, la adición de fertilizantes químicos y orgánicos, o la fijación de nitrógeno por especies de leguminosas cultivadas). La adecuada conservación de los palmerales requiere por tanto de actuaciones inmediatas y sostenibles, que ralenticen y controlen los procesos de degradación y contribuyan a la recuperación de los hábitats afectados.

La optimización de la rizogénesis de la palmera canaria (extensión, morfología y arquitectura radicular), mediante una combinación de técnicas agrológicas, como puede ser la aplicación de enmiendas orgánicas y químicas localizadas, o la inoculación de hongos formadores de micorrizas arbusculares, podría constituir una estrategia de manejo que incremente la resiliencia de estas poblaciones en el contexto actual y futuro de cambio climático. Esta optimización del desarrollo radicular, potencialmente maximizaría la exploración y utilización de los recursos edáficos, particularmente del agua y los nutrientes, y consecuentemente generaría una mejor respuesta fisiológica de la palmera en condiciones de campo frente a factores de estrés bióticos y/o abióticos.

En el presente trabajo se ha evaluado la eficiencia de diferentes prácticas de manejo agrológico (p.ej. aplicación localizada de fertilizantes, aplicación por fertirrigación de lixiviado de humus de lombriz, inoculación de hongos formadores de micorrizas arbusculares), en la mejora del desarrollo radicular de plantas en condiciones de invernadero. La combinación de estas técnicas de gestión podría representar una estrategia viable para favorecer el establecimiento de ejemplares jóvenes en procesos de

revegetación en entornos desfavorables para el desarrollo vegetal, así como incrementar la productividad, la sostenibilidad y la resiliencia de los palmerales en los escenarios climáticos previstos.

De acuerdo con los antecedentes descritos en epígrafes anteriores y la experiencia del equipo investigador, la hipótesis de partida de este proyecto es la ***viabilidad de la aplicación de prácticas agrícolas para optimizar el desarrollo radicular de especímenes de palmera canaria, y favorecer así una mayor exploración del sistema edáfico y un mejor aprovechamiento de los recursos de agua y nutrientes.***



2. Objetivos

El objetivo general del proyecto es la **evaluación bajo diferentes condiciones de manejo agronómico de la rizogénesis de plantas de palmera canaria**. Como objetivos específicos se han establecido los siguientes:

- 1.- Evaluar la influencia de diferentes tratamientos de fertilización y dosis de riego en la producción de biomasa aérea y radicular.
- 2.- Evaluar el efecto de la aplicación de fertilización localizada en la direccionalidad del sistema radicular.
- 3.- Evaluar el efecto combinado de la inoculación con hongos micorrícicos y de la fertilización en la producción de biomasa aérea y radicular.

3. Diseño experimental

El estudio se ha llevado a cabo en dos invernaderos que forman parte de las instalaciones para investigación del Instituto Canario de Investigaciones Agrarias (ICIA), situado en la localidad de Valle Guerra, La Laguna, Tenerife. Se han desarrollado tres diseños experimentales, cada uno de ellos asociado a un objetivo específico.

3.1. Experimento 1. Influencia de diferentes tratamientos de fertilización y dosis de riego en la producción de biomasa aérea y radicular.

El estudio se realizó mediante un experimento factorial de dos vías usando un diseño completamente aleatorio con 5 réplicas por tratamiento (1 tipo de sustrato * 2 edades de planta * 6 tratamientos * 5 réplicas; n = 60). El periodo de estudio tuvo una duración de aproximadamente 8 meses (desde el 08/01/2021 hasta el 01/09/2021). Las condiciones ambientales durante todo el periodo de estudio se monitorizaron en continuo mediante el uso de sensores de temperatura y humedad relativa. La temperatura media fue de 20.5°C, con máximas de 37.8°C y mínimas de 9.6°C. La humedad relativa osciló entre 82.5% y 19.2%, con un valor medio de 61.5%.

- **Material vegetal.-** Se evaluaron especímenes de palmera canaria de dos edades aproximadas: 8 meses y 14 meses en el momento de la plantación (08/01/2021), que fueron germinadas en el vivero de Osorio dependiente del Cabildo de Gran Canaria.
- **Sustrato.-** Se utilizó un tipo de sustrato elaborado a partir de la mezcla de suelo natural, turba y pición en una proporción 1:1:1. La textura del suelo utilizado, proveniente de la finca experimental del ICIA en Valle Guerra, es franco-arcillosa. La caracterización química del sustrato final se muestra en la Tabla 1.

	M.O. %	C.E.es dS/m	pHes	P mg/kg	Ca	Mg -----meq/100g-----	Na	K
Sustrato	7.3	0.71	6.3	16	8.4	3.1	1.7	1.0

Tabla 1. Características químicas del sustrato utilizado en el *Experimento 1*.

- **Contenedores.-** El experimento se realizó a nivel de mesocosmos, en un intento de simular las condiciones de campo que podemos encontrar en los procesos de revegetación. Los sustratos se colocaron en contenedores de plástico reciclado con unas dimensiones de 50*34*34 cm (volumen ~ 58L; Wham Bam Recycled), a una densidad aparente de aproximadamente 1.2 g cm⁻³. Previamente a la colocación de los sustratos la parte inferior de cada contenedor se perforó y se rellenó con una capa de grava de 2 cm de espesor para facilitar el drenaje. Se estableció una planta por contenedor y se

aplicó en superficie una capa de 1 cm de picón de granulometría gruesa para facilitar el establecimiento de las plantas (Figura 1).

• **Riego.-** Las dosis de riego aplicadas fueron aproximadamente el 100% de la evapotranspiración de cultivo (ETc), salvo en el caso de tratamientos vinculados al estrés hídrico donde fue del 50% de la ETc. Los valores semanales de ETc fueron estimados a partir de datos suministrados por el Departamento de Suelos y Riegos del ICIA procedentes de la estación meteorológica TF105 - Valle de Guerra – Isamar (latitud: 28° 30' 23" N longitud: 16° 23' 15" W Altitud: 293 m), situada junto al sitio de estudio. Los valores de coeficiente de cultivo (Kc) fueron los establecidos para palma datilera en FAO (2018). La calidad del agua de riego fue la del agua de abasto en las instalaciones del ICIA (Tabla 2).

	C.E. μS cm ⁻¹	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻
	-----meq L ⁻¹ -----								
Agua de riego	937	8.9	0.66	3.70	7.09	0.38	1.60	7.38	2.40

Tabla 2. Características químicas del agua de riego utilizada en el *Experimento 1*.

• **Tratamientos.-** Se aplicaron 6 tratamientos de manejo agronómico: *i)* aplicación foliar de estimuladores del crecimiento radicular; *ii)* aplicación por fertirrigación de lixiviado de humus de lombriz; *iii)* aplicación de fertilización química con fertilizantes de liberación lenta (osmocote); *iv)* combinación de fertilización química y aplicación foliar de estimuladores del crecimiento radicular; *v)* estrés hídrico (~50% ETc); y *vi)* tratamiento control. Se exponen a continuación las características y dosis aplicadas de los fertilizantes utilizados:

i) Estimuladores de crecimiento radicular (ER). Se realizó una aplicación mensual mediante tratamiento foliar de los productos comerciales MICOR (enraizante biológico formulado a base de polisacáridos y polialcoholes naturales, enriquecido con microelementos y aminoácidos de origen vegetal), y TERRA-SORB (producto con una alta concentración de aminoácidos obtenidos por hidrólisis enzimática). Las dosis fueron de 0.5 % para el MICOR y 0.2 % para el TERRA-SORB en aplicación conjunta.

ii) Lixiviado de humus de lombriz (LL). Se realizó una aplicación mensual de té de humus de lombriz FINCA VIVA (bioestimulante rico en ácidos húmicos y fúlvicos, elaborado a partir de estiércol animal y restos triturados de poda y compostaje). La dosis de aplicación fue de 50 ml por litro de agua de riego.

iii) Fertilizantes de liberación lenta (osmocote; OS). Se realizó una aplicación en el momento de la plantación de 150 gramos por contenedor de MULTICOTE 12M (fertilizante NPK 17-6-14 con micronutrientes). El fertilizante se distribuyó de forma homogénea en la superficie del sustrato.

- **Parámetros evaluados**

Medidas biométricas. Se tomaron medidas del número de hojas emitidas y altura de las plantas con una periodicidad mensual. Al final del periodo de estudio se tomaron además medidas del diámetro de la parte basal del tallo.

Respuestas fisiológicas. Tras cinco meses desde el inicio de la aplicación de los tratamientos se determinaron los parámetros de fluorescencia, y de contenido en clorofilas como indicadores de la eficiencia fotosintética. Se determinó simultáneamente el contenido en flavonoides y antocianinas como indicadores de estrés abiótico. La eficiencia fotoquímica máxima (Fv/Fm) fue determinada con un fluorímetro portátil (Handy PEA, Hansatech, Reino Unido) después de 30 minutos de adaptación a la oscuridad. Los contenidos en clorofila, flavonoides y antocianinas, además del índice de balance de nitrógeno (NBI) fueron analizados mediante el uso del equipo Dualex-ForceA.

Biomasa aérea y radicular. Al final del periodo de estudio se realizó el corte, pesado en fresco, secado a 60°C durante 48 horas y posterior pesado en seco de la parte aérea y del sistema radicular de cada planta, con el objeto de determinar la producción total de biomasa fresca y seca, así como la relación biomasa aérea/biomasa radicular.

- **Análisis estadísticos**

Los métodos estadísticos se implementaron utilizando IBM SPSS Statistics V21.0, y CANOCO V4.5. El nivel de significancia para todas las pruebas se estableció en $p \leq 0.05$. Los supuestos de normalidad (prueba de Kolmogorov Smirnov) y homogeneidad de varianza (prueba de Levene) se cumplieron para cada análisis. Se utilizó un modelo lineal general univariado y prueba *post-hoc* de Tukey para determinar el efecto del tratamiento de fertilización y de la edad de la planta sobre la producción de biomasa, parámetros morfológicos y fisiológicos. Se llevó a cabo un análisis de componentes principales (PCA) para examinar la ordenación y distribución de los ejemplares de palmera canaria bajo diferentes tratamientos con respecto a los parámetros evaluados.

3.2. Experimento 2. Efecto de la aplicación de fertilización localizada en la direccionalidad del sistema radicular de ejemplares de palmera canaria.

El estudio se realizó mediante un experimento factorial de dos vías usando un diseño completamente aleatorio con 4 réplicas por tratamiento (1 tipo de sustrato * 2 edades de planta * 5 tratamientos * 4 réplicas; $n = 40$). El periodo de estudio, condiciones ambientales, contenedores, material vegetal, sustrato, número de plantas por contenedor, condiciones de drenaje, dosis de riego, y calidad del agua de riego fueron las mismas que las expuestas para el *Experimento 1*.

- **Distribución del sistema radicular.-** Con anterioridad a la adición de sustrato, en el interior de cada contenedor se colocó una gradilla metálica que permitió separar el volumen total en 6 secciones con un volumen aproximado cada una de 6400 cm³ (Figura 2).

- **Tratamientos.-** Se aplicaron 5 tratamientos de manejo agronómico: *i)* aplicación localizada de fertilizante de liberación lenta (osmocote) a 5 cm de profundidad en el sustrato; *ii)* aplicación localizada de fertilizante de liberación lenta (osmocote) a 20 cm de profundidad en el sustrato; *iii)* aplicación localizada de fertilizante orgánico (compost) a 5 cm de profundidad en el sustrato; *iv)* aplicación localizada de fertilizante orgánico (compost) a 20 cm de profundidad en el sustrato; y *vi)* tratamiento control sin fertilización. Se exponen a continuación las características y dosis aplicadas de los fertilizantes utilizados:

Fertilizante de liberación lenta (osmocote; Osm). Se realizó una aplicación en el momento de la plantación de 19 gramos por contenedor de MULTICOTE 12M (fertilizante NPK 17-6-14 con micronutrientes). El fertilizante fue repartido en dos bolsas porosas de tela que fueron colocadas a diferente profundidad (según tratamiento), solamente en un lado del contenedor (Figura 2).

Fertilizante orgánico (compost; Com). Se realizó una aplicación en el momento de la plantación de 199 gramos por contenedor de MULTIORGAN, un fertilizante orgánico peletizado fabricado con un 95% de estiércol natural de oveja y un 5% de materia orgánica vegetal. El fertilizante fue repartido en dos bolsas porosas de tela que fueron colocadas a diferente profundidad (según tratamiento), solamente en un lado del contenedor (Figura 2).

- **Parámetros evaluados**

Se evaluaron los mismos parámetros biométricos (altura, diámetro, y número de hojas), fisiológicos (contenido en clorofila, antocianinas, flavonoides, Fv/Fm, y NBI), y de producción de biomasa aérea, que en el *Experimento 1*. En cuanto a la **Biomasa radicular**, al final del periodo de estudio el sistema radicular fue muestreado por sectores (6 sectores generados por la gradilla metálica). Para cada uno de ellos la raíces fueron separadas en finas (< 2 mm de diámetro) y gruesas (> 2 mm de diámetro), pesadas en fresco, secadas a 60°C durante 48 horas y posteriormente pesadas en seco con el objeto de determinar la producción total de biomasa radicular fresca y seca. La longitud, volumen, y densidad de longitud de raíces, fue determinada mediante el uso del software WinRhizo® (Régent Instrument Inc., Canadá), un sistema de análisis computacional de imágenes, diseñado para realizar mediciones de las raíces de las plantas en términos de su morfología, topología, arquitectura y color (Figura 3; Gutiérrez-Soto et al., 2014).

- **Análisis estadísticos**

Se utilizó un modelo lineal general univariado y prueba *post-hoc* de Tukey para determinar el efecto del tratamiento de fertilización y de la edad de la planta sobre la producción de biomasa, parámetros morfológicos y fisiológicos. Las diferencias entre los sectores establecidos en los contenedores con respecto a los parámetros de desarrollo radicular se establecieron mediante la aplicación de un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, y cuando se comparó por pares sectores fertilizados y no fertilizados se utilizó una prueba T para muestras independientes.

3.3. Experimento 3. Efecto de la inoculación con hongos micorrícicos en la producción de biomasa aérea y radicular de ejemplares de palmera canaria.

El estudio se realizó mediante un experimento de dos vías usando un diseño completamente aleatorio con 10 réplicas por tratamiento (1 tipo de sustrato * 1 edad de planta * 2 tratamientos de micorrización * 3 tratamientos de fertilización * 10 réplicas; n = 60). El periodo de estudio se extendió desde el 20 de noviembre de 2020 hasta el 22 de septiembre de 2021.

- **Material vegetal.-** A partir de semillas de *Phoenix canariensis* germinadas en cama caliente se obtuvieron ejemplares que fueron trasplantados con aproximadamente 3 meses de edad a macetas forestales de plástico de 5L de capacidad, rellenas del mismo sustrato utilizado en el *Experimento 1*, pero en este caso desinfectado en máquina de vapor. Los sustratos se colocaron a una densidad aparente aproximada de 1.0 g cm⁻³. Se estableció una planta por contenedor y se aplicó en superficie una capa de 1 cm de picón de granulometría gruesa para facilitar el establecimiento de las plantas (Figura 4). Las dosis de riego aplicadas fueron aproximadamente el 100% de la ETc, y la calidad del agua de riego fue similar a la utilizada en el *Experimento 1*.

- **Tratamientos.-** Se aplicaron 2 tratamientos de micorrización: *i)* aplicación de inóculo y *ii)* sin aplicación de inóculo. La mitad de las semillas (n=30) fueron inoculadas y la otra mitad (n=30) no recibieron el inóculo. Se utilizó inóculo bruto (suelo rizosférico, raicillas y esporas) del aislado local del hongo MA *Glomus mosseae* registrado en el Banco Europeo de Glomales con el número BEG234. La inoculación se realizó en el momento de la siembra, inmediatamente por debajo de la semilla, a razón de 40 cm³ de inóculo y una riqueza del 72%.

Se aplicaron 3 tratamientos de fertilización: *i)* aplicación de fertilizante químico de liberación lenta; *ii)* aplicación de fertilizante orgánico; y *iii)* aplicación de solución nutritiva baja en fósforo (Hewitt, 1952), utilizado como control. Los fertilizantes químico y orgánico fueron los mismos que los utilizados en el *Experimento 2*, y se aplicaron en superficie del sustrato en el momento del trasplante en cantidades de 18 y 24 g por planta, respectivamente. La solución nutritiva se aplicó por fertirriego.

- **Parámetros evaluados**

Medidas biométricas. Se tomaron medidas del número de hojas emitidas, altura de la planta, diámetro del tallo, y longitud radicular, al final del periodo de estudio (plantas de aproximadamente 10 meses de edad).

Biomasa aérea y radicular. Al final del periodo de estudio se realizó el corte, pesado en fresco, secado a 60°C durante 48 horas y posterior pesado en seco de la parte aérea y del sistema radicular de cada planta, con el objeto de determinar la producción total de biomasa fresca y seca, así como la relación biomasa aérea/biomasa radicular.

- **Análisis estadísticos**

Se utilizó un modelo lineal general univariado y prueba *post-hoc* de Tukey para determinar el efecto de la micorrización y del tratamiento de fertilización sobre la producción de biomasa y los parámetros morfológicos evaluados. Dentro de un mismo tratamiento de fertilización, la comparación por pares entre ejemplares micorrizados y no micorrizados se realizó utilizando una prueba T para muestras independientes.

4. Resultados y discusión

4.1. Experimento 1. Influencia de diferentes tratamientos de fertilización y dosis de riego en la producción de biomasa aérea y radicular.

La Tabla 3 recoge los valores medios de parámetros morfológicos transcurridos 8 meses desde la plantación. En la Figura 5 se presenta la totalidad de los datos morfológicos en diagramas de cajas. Los análisis estadísticos muestran que la altura, diámetro y número de hojas de las palmeras no se vieron afectados por la edad de las plantas ($p > 0.05$), pero sí por el tratamiento aplicado ($p < 0.05$). Así, las palmeras tratadas con osmocote, y osmocote más estimulante radicular, presentaron los valores más altos de los tres rasgos morfológicos medidos. Los valores medios más bajos se observaron en el tratamiento de estrés hídrico (diámetro y número de hojas), y en el control (altura) (Tabla 3).

Tratamiento/ Parámetro	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Nº de hojas
Control	32.6 ± 2.4 a	2.8 ± 0.3 ab	9.1 ± 1.4 ab
Estrés hídrico	33.9 ± 4.9 a	2.6 ± 0.2 a	8.3 ± 0.7 a
Lixiviado de humus de lombriz	32.7 ± 3.3 a	3.0 ± 0.4 b	8.8 ± 0.8 ab
Estimulante radicular	34.0 ± 5.6 a	2.8 ± 0.3 ab	8.6 ± 0.8 a
Osmocote	43.1 ± 7.2 b	4.1 ± 0.6 c	10.0 ± 1.2 b
Osmocote + estimulante radicular	43.9 ± 5.8 b	4.3 ± 0.4 c	9.9 ± 0.6 b

Tabla 3. Parámetros biométricos en plantas de palmera canaria bajo diferentes tratamientos, transcurridos 8 meses desde la plantación; media ± desviación estándar; n = 10; letras diferentes junto a los valores medios indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

En cuanto a la producción de biomasa aérea y radicular, el modelo estadístico mostró que éstos parámetros no se vieron afectados por la edad de la planta pero sí por el tratamiento aplicado (Tabla 4 y Figura 6). Los tratamientos con osmocote (con y sin estimulante radicular) fueron significativamente ($p > 0.05$) más eficientes en la producción de biomasa aérea y radicular, húmeda y seca, que el resto de tratamientos. La ratio biomasa aérea / biomasa radicular siguió el mismo patrón que para los anteriores parámetros, incrementándose por un factor de 2 en los tratamientos con osmocote con respecto al resto de manejos (Tabla 4 y Figura 6). Esta relación, sin embargo, se vio afectada por la edad de las plantas siendo en término medio mayor en las palmeras plantadas con 8 meses (16 meses de edad) que las plantadas con 14 meses (22 meses de edad). En las plantas más jóvenes (~16 meses) la ratio fue de 1.9 frente a 1.5 en las de mayor edad (~ 22 meses). El tratamiento de estrés hídrico

mostró los niveles medios más bajos de todos los parámetros morfológicos y de producción de biomasa (Tabla 4).

Tratamiento/ Parámetro	Biomasa aérea húmeda	Biomasa radicular húmeda	Biomasa aérea seca	Biomasa radicular seca	Ratio
-----g por planta-----					
Control	61.5 ± 11.3 a	67.7 ± 16.1 a	16.6 ± 3.4 a	12.8 ± 2.7 a	1.3 ± 0.3 a
Estrés hídrico	46.9 ± 10.3 a	50.2 ± 6.6 a	13.4 ± 3.2 a	12.9 ± 3.6 a	1.0 ± 0.2 a
Lixiviado de humus lombriz	68.5 ± 37.5 a	66.6 ± 18.8 a	14.8 ± 4.5 a	14.0 ± 3.4 a	1.1 ± 0.3 a
Estimulante radicular	58.4 ± 17.2 a	61.3 ± 18.5 a	16.1 ± 4.6 a	12.2 ± 4.2 a	1.4 ± 0.3 a
Osmocote	210.5 ± 72.3 b	146.0 ± 60.3 b	65.2 ± 26.3 b	25.3 ± 11.6 b	2.6 ± 0.5 b
Osmocote + est. radicular	181.6 ± 40.1 b	131.1 ± 27.0 b	61.7 ± 11.6 b	24.9 ± 4.4 b	2.5 ± 0.6 b

Tabla 4. Producción de biomasa aérea y radicular en plantas de palmera canaria bajo diferentes tratamientos, transcurridos 8 meses desde la plantación; media ± desviación estándar; n = 10; Ratio, biomasa aérea seca / biomasa radicular seca; letras diferentes junto a los valores medios indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

La respuesta fisiológica de los ejemplares de palmera canaria a los diferentes tratamientos se recoge en la Tabla 5 y en las Figuras 7 y 8. Todos los parámetros fisiológicos fueron afectados significativamente ($p < 0.05$) por la edad de la planta y por los tratamientos aplicados. Mientras el contenido en clorofila y el NBI presentaron mayores niveles en los tratamientos con osmocote, ocurrió lo contrario con los contenidos en flavonoides y antocianinas, donde las plantas fertilizadas con osmocote mostraron niveles en general significativamente más bajos (Tabla 5; Figuras 7 y 8). La eficiencia fotoquímica no presentó diferencias significativas entre los diferentes tratamientos, aunque una ligera tendencia fue observada hacia valores más bajos en los tratamientos de estrés hídrico (Figura 7). Las plantas jóvenes presentaron de media niveles más altos de clorofila (41.6 vs. 36.3), de eficiencia fotoquímica (0.796 vs. 0.789), y de NBI (37.8 vs. 31.6), que las plantas de mayor edad. Sin embargo, mostraron concentraciones más bajas de flavonoides (1.108 vs. 1.193), y de antocianinas (0.109 vs. 0.133).

La Figura 9 muestra el aspecto que presentaron durante el cultivo ejemplares fertilizados con osmocote y ejemplares con el tratamiento control, mientras la Figura 10 recoge la apariencia de la parte aérea y del sistema radicular de ejemplares con tratamiento de osmocote y tratamiento control al final de la experiencia.

Tratamiento/ Parámetro	Clorofila $\mu\text{g cm}^{-2}$	Fv/Fm	NBI	Flavonoides ---Absorbancia relativa---	Antocianinas
Control	29.1 \pm 7.6 a	0.79 \pm 0.01 a	25.8 \pm 8.2 a	1.15 \pm 0.11 b	0.15 \pm 0.03 b
Estrés hídrico	33.3 \pm 11.1 a	0.78 \pm 0.01 a	30.0 \pm 10.7 a	1.13 \pm 0.09 b	0.15 \pm 0.04 b
Lixiviado de humus de lombriz	29.9 \pm 10.4 a	0.79 \pm 0.01 a	25.4 \pm 10.3 a	1.20 \pm 0.11 b	0.15 \pm 0.05 b
Estimulante radicular	30.0 \pm 8.6 a	0.79 \pm 0.01 a	25.1 \pm 7.3 a	1.21 \pm 0.16 b	0.15 \pm 0.04 b
Osmocote	56.6 \pm 8.0 b	0.80 \pm 0.01 a	54.3 \pm 8.8 b	1.05 \pm 0.09 a	0.05 \pm 0.02 a
Osmocote + est. radicular	53.5 \pm 5.1 b	0.80 \pm 0.01 a	45.8 \pm 5.3 b	1.17 \pm 0.06 b	0.07 \pm 0.02 a

Tabla 5. Parámetros fisiológicos en plantas de palmera canaria tras 8 meses de tratamientos; media \pm desviación estándar; n = 10; letras diferentes junto a los valores medios indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

Con el objetivo de integrar todos los resultados obtenidos en este experimento, se ha realizado una ordenación de las muestras (ejemplares de palmera canaria) atendiendo a los parámetros analizados, utilizando un PCA (Figura 11). En este análisis, el porcentaje de varianza explicado con dos componentes fue del 79,4%, un valor bastante alto que indica que las conclusiones derivadas de la figura bidimensional son representativas de la verdadera ordenación de las muestras. En el gráfico se pueden separar dos grupos bastante definidos: un grupo formado por ejemplares de palmera bajo tratamientos con osmocote y osmocote más estimulante radicular, y otro formado por los ejemplares bajo el resto de tratamientos. El primer grupo se sitúa en el lado derecho del gráfico, donde los valores de los parámetros biométricos (altura, diámetros de tallo y producción de biomasa, que aparecen altamente correlacionados), de las medidas fisiológicas indicadoras de la actividad fotosintética (clorofila, Fv/Fm), y del estado nutricional con respecto al nitrógeno (NBI), son más altos. El segundo grupo, situado en el lado izquierdo del gráfico presenta valores bajos de los parámetros mencionados, y por el contrario las más altas concentraciones de flavonoides y antocianinas.

Los resultados obtenidos podrían estar relacionados con un mejor estado nutricional de la planta con respecto al nitrógeno, bajo los tratamientos con osmocote. Tanto la clorofila como los polifenoles (flavonoides) son buenos indicadores de este estado. Cuando una planta se encuentra en óptimas condiciones, favorece su metabolismo primario, sintetizando proteínas, moléculas que contienen nitrógeno, presentes en la clorofila, y sintetizan muy pocos flavonoides y antocianinas que son compuestos secundarios a base de carbono. Por el contrario, en caso de deficiencia en nitrógeno, la planta dirige su metabolismo hacia una mayor producción de flavonoides y antocianinas (Bracke et al.,

2019). En particular las antocianinas son flavonoides que tienen capacidad antioxidante por lo que evitan la producción de radicales libres asociados a cualquier estrés en la planta. Nuestros resultados ponen de manifiesto la importancia de un adecuado suministro de nitrógeno para el óptimo desarrollo de la palmera canaria en el momento del trasplante. Esto coincide con datos publicados por diversos autores para otros tipos de palmeras, que concluyen que durante los primeros seis meses después del trasplante, las palmeras tratadas con fertilizantes ricos en nitrógeno se establecen con mayor rapidez que las tratadas con fertilizantes con bajo contenido en este nutriente (Broschat y Elliott, 2009; Broschat y Moore, 2010). Aunque los tratamientos de lixiviado de humus de lombriz y los de aplicación foliar, utilizados en el presente estudio, contenían nitrógeno, las dosis aplicadas fueron excesivamente bajas para generar un efecto positivo en el desarrollo de la planta, o se lixiviaron rápidamente debido a las dosis de riego y a la relativamente baja capacidad de retención del sustrato utilizado.

La dosis de riego aplicada en el tratamiento denominado "estrés hídrico", que consistió en aproximadamente un 50% de la ETc, no fue lo suficientemente baja como para generar una disminución significativa del desarrollo con respecto al control. Esto podría indicar que los requerimientos hídricos de la palmera canaria, al menos en las condiciones de estudio, pueden ser significativamente menores que los calculados teóricamente.

4.2. Experimento 2. Efecto de la aplicación de fertilización localizada en la direccionalidad del sistema radicular de ejemplares de palmera canaria.

Efectos globales. La Tabla 6 y la Figura 12 muestran los valores de parámetros morfológicos bajo diferentes tratamientos de fertilización localizada, transcurridos 8 meses desde la plantación. Los análisis estadísticos muestran que la altura y diámetro del tallo de las palmeras no se vieron afectados por la edad de las plantas ($p > 0.05$), pero sí por el tratamiento aplicado ($p < 0.05$). Así, las palmeras tratadas con cualquier tratamiento de fertilización, ya sea química como orgánica, incrementaron significativamente la altura y el diámetro de las plantas en más de 6 cm y de 1.1 cm, respectivamente, con respecto a los controles (Tabla 6, Figura 12). Cabe destacar que no se observó diferencias entre los tratamientos químicos y orgánicos. El número de hojas sí se vio afectado por la edad de las plantas, siendo el valor medio ligeramente superior en los ejemplares de 22 meses con respecto a los de 16 meses de edad (9.8 vs. 9.1). Los tratamientos de fertilización produjeron un incremento significativo en el número de hojas, particularmente el de osmocote a 5 cm de profundidad que generó durante el periodo de estudio 2 hojas más que los controles.

Tratamiento/ Parámetro	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Nº de hojas
Control	32.6 ± 2.3 a	2.7 ± 0.4 a	8.3 ± 1.0 a
Compost a 5 cm de profundidad	38.7 ± 3.7 b	3.8 ± 0.3 b	9.1 ± 0.6 ab
Compost a 20 cm de profundidad	40.4 ± 6.5 b	3.9 ± 0.4 b	9.5 ± 1.2 b
Osmocote a 5 cm de profundidad	41.3 ± 4.6 b	3.9 ± 0.5 b	10.6 ± 1.1 c
Osmocote a 20 cm de profundidad	39.8 ± 3.9 b	4.1 ± 0.4 b	9.9 ± 1.0 bc

Tabla 6. Parámetros biométricos en plantas de palmera canaria bajo diferentes tratamientos, transcurridos 8 meses desde la plantación; media ± desviación estándar; n = 8; letras diferentes junto a los valores medios indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

La Tabla 7 y la Figura 13 muestran los resultados de la producción de biomasa bajo las distintas condiciones evaluadas. La edad de las plantas no generó efectos significativos sobre los parámetros estudiados, sin embargo todos ellos se vieron afectados positivamente por los tratamientos de fertilización localizada. La biomasa aérea (húmeda y seca) presentó los valores significativamente más altos en los ejemplares con fertilización con osmocote (~ 3 veces más que en los controles), seguidos de los de fertilización orgánica (~ 2 veces más que en los controles; Tabla 7, Figura 13). La producción de biomasa radicular (húmeda y seca), fue incrementada por igual con ambos tipos de fertilización, doblando los niveles observados en los controles (Tabla 7, Figura 13). Los valores de la ratio biomasa

aérea / biomasa radicular aumentaron en más de 1.2 puntos en los tratamientos químicos con respecto a los controles, sin embargo no sufrieron un incremento significativo en los tratamientos con fertilizante orgánico (Tabla 7, Figura 13).

Tratamiento/ Parámetro	Biomasa aérea húmeda	Biomasa radicular húmeda	Biomasa aérea seca	Biomasa radicular seca	Ratio
	-----g por planta-----				
Control	59.0 ± 15.1 a	49.0 ± 13.5 a	16.6 ± 2.1 a	8.9 ± 2.9 a	2.1 ± 1.0 a
Compost a 5 cm de profundidad	133.4 ± 11.9 b	93.9 ± 12.2 b	35.7 ± 6.3 b	16.6 ± 3.1 b	2.2 ± 0.1 a
Compost a 20 cm de profundidad	139.9 ± 39.3 b	96.4 ± 21.4 b	38.3 ± 14.2 b	17.0 ± 5.3 b	2.3 ± 0.4 a
Osmocote a 5 cm de profundidad	185.7 ± 29.8 c	88.4 ± 21.6 b	52.6 ± 8.2 c	15.7 ± 3.0 b	3.4 ± 0.4 b
Osmocote a 20 cm de profundidad	183.4 ± 54.7 c	94.7 ± 20.1 b	52.1 ± 18.0 c	15.6 ± 3.9 b	3.3 ± 0.6 b

Tabla 7. Producción de biomasa aérea y radicular en plantas de palmera canaria bajo diferentes tratamientos, transcurridos 8 meses desde la plantación; media ± desviación estándar; n = 8; Ratio, biomasa aérea seca / biomasa radicular seca; letras diferentes junto a los valores medios indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

Finalmente, de entre las respuestas fisiológicas, solamente el contenido en clorofila estuvo afectado por la edad de las plantas ($\sim 50 \mu \text{cm}^{-2}$ en plantas de 22 meses *vs.* $45 \mu \text{cm}^{-2}$ en plantas de 16 meses), y por los tratamientos de fertilización. El resto de parámetros fisiológicos presentó exclusivamente una respuesta significativa a los tratamientos de fertilización (Tabla 8, Figuras 14 y 15). Los niveles de clorofila y de NBI se multiplicaron por un factor de 2 en plantas fertilizadas, independientemente del tipo de fertilización, respecto a los ejemplares control. Por el contrario, las concentraciones de flavonoides y antocianinas, se redujeron en las plantas fertilizadas. Esta reducción fue particularmente significativa en el caso de las antocianinas, con niveles en las plantas fertilizadas 2-3 veces menores que en los controles (Tabla 8, Figuras 14 y 15). La totalidad de los parámetros analizados (biométricos, de producción de biomasa, y fisiológicos), no mostraron diferencias significativas atendiendo a la profundidad en la que se localizó el fertilizante (5 o 20 cm).

Tratamiento/ Parámetro	Clorofila $\mu\text{g cm}^{-2}$	Fv/Fm	NBI	Flavonoides ---Absorbancia relativa---	Antocianinas
Control	28.9 \pm 4.7 a	0.78 \pm 0.02 a	24.8 \pm 6.0 a	1.20 \pm 0.17 b	0.15 \pm 0.04 b
Compost a 5 cm de profundidad	53.3 \pm 5.9 b	0.78 \pm 0.01 a	52.5 \pm 12.3 b	1.04 \pm 0.14 a	0.06 \pm 0.02 a
Compost a 20 cm de profundidad	49.4 \pm 7.2 b	0.79 \pm 0.02 a	46.6 \pm 6.5 b	1.07 \pm 0.15 ab	0.08 \pm 0.02 a
Osmocote a 5 cm de profundidad	53.2 \pm 4.0 b	0.80 \pm 0.02 a	50.2 \pm 4.9 b	1.06 \pm 0.09 ab	0.05 \pm 0.01 a
Osmocote a 20 cm de profundidad	53.6 \pm 3.8 b	0.79 \pm 0.01 a	47.7 \pm 3.6 b	1.11 \pm 0.11 ab	0.07 \pm 0.02 a

Tabla 8. Parámetros fisiológicos en plantas de palmera canaria tras 8 meses de tratamientos; media \pm desviación estándar; n = 8; letras diferentes junto a los valores medios indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$).

Los resultados obtenidos en este preliminar análisis global del *Experimento 2*, concuerdan en gran medida con los observados en el *Experimento 1*. Los ejemplares de palmera canaria presentan una evidente respuesta positiva a la fertilización, incrementándose la producción de biomasa aérea y radicular, y generándose plantas de mayor porte, probablemente consecuencia directa de un mejor estado nutricional que queda patente en la menor producción de antioxidantes (flavonoides y antocianinas). Sin embargo, en los resultados globales de esta experiencia, se refleja también la capacidad de los fertilizantes orgánicos en forma sólida, cuando son aplicados en concentraciones suficientemente altas, de igualar o superar los efectos positivos de los fertilizantes químicos. Las cantidades de compost utilizadas en este estudio, que proporcionaron niveles de nitrógeno similares a los presentes en el osmocote, incrementaron en gran medida la producción de biomasa radicular, pero muy poco la producción de biomasa aérea. Se obtuvieron así, plantas más equilibradas en cuanto a la relación sistema aéreo / sistema radicular, que las tratadas con fertilización química.

Efectos localizados. Con el objetivo de evaluar si la fertilización localizada ha sido capaz de modificar la direccionalidad del sistema radicular de las palmeras, en una primera aproximación se ha comparado la biomasa radicular entre los sectores del lado del contenedor directamente afectados por la localización del fertilizante (sectores 1, 2 y 3), y los sectores del lado del contenedor donde no se ha colocado fertilizante (sectores 4, 5 y 6) (Figura 2). En la Figura 16 se muestran los resultados obtenidos. Como puede observarse, la biomasa de raíces gruesas (> 2 mm de diámetro) fue generalmente similar en el

lado fertilizado y no fertilizado, tanto en los controles como en los tratamientos (Figura 16 arriba). Solamente con el compost localizado a 20 cm de profundidad se obtuvo un incremento significativo de biomasa de raíces gruesas en el lado fertilizado con respecto al no fertilizado. Sin embargo, la biomasa de raíces finas (< 2 mm de diámetro) se vio significativamente aumentada por la fertilización, independientemente del tipo y profundidad a la que fue colocado el fertilizante (Figura 16 abajo). En términos generales, la producción de biomasa de raíces finas se incrementó por un factor de 1.7 en el lado fertilizado (de media, el lado fertilizado acumuló aproximadamente el 64 % del total de raíces finas, frente al 36% en el lado no fertilizado). En los tratamientos control, por su parte, no se produjo diferencias significativas. Estos resultados indican que los fertilizantes químicos y orgánicos potencialmente provocaron una estimulación de la producción de raíces funcionales, responsables de la absorción de agua y nutrientes, en las zonas del contenedor en que fueron aplicados.

El porcentaje de raíces finas por sectores individuales para cada tratamiento se muestra en la Figura 17. En los ejemplares control no existe una tendencia clara de concentración de raíces en alguno de los 6 sectores. En los tratamientos de fertilización, por el contrario, en general se observa una acumulación de raíces en el Sector 1, zona que pueden alcanzar los nutrientes al ser solubilizados y transportados por el agua de riego en su movimiento predominantemente vertical. Esta concentración es particularmente significativa en los tratamientos con compost a 5 y 20 cm de profundidad, y con osmocote a 20 cm de profundidad. En la aplicación de osmocote a 5 cm se observa también una tendencia hacia una mayor concentración en ese sector, pero sin llegar a ser estadísticamente significativa.

Un parámetro que puede aportar información más relevante que la proporcionada por la biomasa radicular es la densidad de longitud de la raíz (DLR; longitud total de raíces por unidad de volumen de suelo). Se trata de un factor clave para estimar el volumen de suelo explorado por un sistema de raíces y, en consecuencia, la cantidad de agua y nutrientes disponibles para la planta (Chopart et al., 2018), y se ha utilizado para diversos propósitos como por ejemplo la selección de variedades tolerantes a la sequía (Faye et al., 2019). Generalmente, la DLR aumenta significativamente con el porcentaje de raíces laterales finas (diámetro < 1 mm) y disminuye al aumentar el diámetro de las raíces (Pohl et al., 2009). Las raíces laterales finas a menudo desarrollan pelos radiculares y constituyen los principales sitios de absorción de agua y nutrientes (Burylo et al., 2012).

En nuestro caso, la cuantificación de la DLR nos permite representar la distribución aproximada de la arquitectura radicular (Figura 18), y determinar de forma óptima los efectos de la fertilización localizada. En la Figura 18 se muestran los mapas de distribución radicular para un ejemplar de palmera (seleccionado al azar) por tratamiento. Como puede observarse, en el control, la distribución de la DLR es más o menos homogénea en todos los sectores, con una pequeña acumulación en el Sector 5. En los tratamientos de fertilización, sin embargo, existe una gradación de la DLR desde valores muy bajos

(en azul $< 0.1 \text{ cm cm}^{-3}$), en la parte izquierda de los contenedores, hasta valores muy altos (en rojo $\sim 0.32 \text{ cm cm}^{-3}$), en la parte derecha de los contenedores que corresponde a áreas inmediatamente por debajo o próximas a la localización de los fertilizantes.

Los resultados de este experimento aportan evidencias (que deben ser reforzadas con nuevos estudios en el futuro), sobre la capacidad de la palmera canaria de responder a un suministro heterogéneo de nutrientes en el suelo con un crecimiento compensatorio de la raíz. Este crecimiento compensatorio significa que la proliferación dentro la zona enriquecida con nutrientes (especialmente N y P) compensa, y puede ser proporcional al efecto inhibitor de la disponibilidad limitada de estos nutrientes en el desarrollo de raíces finas fuera de esta zona (Robinson, 1994). La proliferación de raíces laterales en respuesta a parches de nutrientes localizados está bien documentado en muchas especies cultivadas en diferentes medios artificiales. Una discusión detallada de los mecanismos moleculares responsables de este proceso en zonas ricas en nutrientes se puede consultar en Jones y Ljung (2012). De este modo, la aplicación localizada de fertilizantes a determinadas profundidades en el perfil del suelo, ofrece una oportunidad para manipular la distribución de raíces laterales finas, promoviendo así una arquitectura radicular que puede incrementar la exploración del sistema edáfico y el aprovechamiento de los recursos de agua y nutrientes, colaborando además potencialmente con el control de los procesos erosivos (Ola et al., 2015).



4.3. Experimento 3. Efecto de la inoculación con hongos micorrícicos en la producción de biomasa aérea y radicular de ejemplares de palmera canaria.

En la Tabla 9 y en la Figura 19 se recogen los resultados de medidas biométricas, bajo diferentes tratamientos. El modelo lineal general aplicado mostró que solamente el diámetro del tallo y el número de hojas se vieron afectados significativamente por la micorrización, mientras que todos los parámetros experimentaron un cambio significativo debido al tipo de fertilizante utilizado. En la comparación por pares (Figura 19), se aprecia como la micorrización incrementó la longitud radicular en el tratamiento con compost, el diámetro en los tratamientos con compost y solución nutritiva, y el número de hojas en todos los tratamientos (Tabla 9).

Tratamiento/ Parámetro	Longitud aérea	Longitud radicular	Diámetro	Nº de hojas
	-----cm-----			
Solución nutritiva	36.2 ± 3.0	28.3 ± 2.9	2.1 ± 0.4	6.2 ± 0.6
Solución nutritiva + micorrizas	34.2 ± 4.3	29.2 ± 2.9	2.5 ± 0.1	6.8 ± 0.6
Compost	31.2 ± 4.1	35.7 ± 4.5	0.8 ± 0.3	4.9 ± 0.7
Compost + micorrizas	33.0 ± 3.6	41.2 ± 6.0	1.4 ± 0.2	5.6 ± 0.5
Osmocote	34.8 ± 3.5	30.7 ± 5.6	1.7 ± 0.6	6.0 ± 1.2
Osmocote + micorrizas	32.1 ± 3.8	29.4 ± 2.8	1.9 ± 0.5	6.4 ± 0.8

Tabla 9. Parámetros biométricos en plantas de palmera canaria bajo diferentes tratamientos, transcurridos 10 meses desde la germinación; media ± desviación estándar; n = 10.

La producción de biomasa aérea y radicular, y parámetros asociados, se recogen en la Tabla 10 y en la Figura 20. En este caso, el modelo lineal general indicó diferencias significativas en todos los parámetros evaluados debido a la micorrización y a los diferentes tipos de fertilizantes aplicados. Los ejemplares inoculados exhibieron un aumento de la biomasa, tanto aérea como radicular, en todos los casos con respecto a los no inoculados. El incremento más acusado se observó en los tratamientos con compost, donde las micorrizas multiplicaron la producción de biomasa radicular por un factor de 2 (Tabla 10). Los valores de la ratio biomasa aérea/biomasa radicular, se vieron, sin embargo, disminuidos por el efecto de la micorrización en los tratamientos con compost y con osmocote (Figura 20). Esto indica que en estos ejemplares la micorrización incrementó en mayor grado la producción de raíces frente a la parte aérea. Las Figuras 21 y 22 están compuestas por fotografías de ejemplares representativos de cada uno de los tratamientos evaluados.

Tratamiento/ Parámetro	Biomasa aérea húmeda	Biomasa radicular húmeda	Biomasa aérea seca	Biomasa radicular seca	Ratio
	-----g por planta-----				
Solución nutritiva	29.2 ± 4.7	18.6 ± 3.9	10.3 ± 1.6	4.5 ± 0.7	2.3 ± 0.4
Solución nutritiva + micorrizas	36.4 ± 3.5	22.4 ± 3.5	12.3 ± 1.4	5.2 ± 0.6	2.4 ± 0.3
Compost	9.6 ± 1.8	8.9 ± 2.3	3.0 ± 0.5	1.9 ± 0.5	1.6 ± 0.3
Compost + micorrizas	16.6 ± 2.0	17.9 ± 4.2	5.0 ± 0.8	3.7 ± 0.6	1.4 ± 0.2
Osmocote	25.9 ± 6.9	14.7 ± 4.5	8.9 ± 2.4	3.2 ± 1.0	2.9 ± 0.5
Osmocote + micorrizas	34.5 ± 5.5	23.0 ± 5.4	10.8 ± 1.8	4.9 ± 1.3	2.3 ± 0.5

Tabla 10. Producción de biomasa en plantas de palmera canaria bajo diferentes tratamientos, transcurridos 10 meses desde la germinación; media ± desviación estándar; n = 10; Ratio, biomasa aérea seca / biomasa radicular seca.

Los resultados del *Experimento 3* indican que potencialmente se han generado efectos sinérgicos positivos entre los tratamientos de fertilización y la presencia de hongos micorrícicos. Atendiendo a que la función principal de las micorrizas es la transferencia de nutrientes minerales del hongo a la planta (en la mayoría de los casos también hay una transferencia sustancial de metabolitos de la planta al hongo), podemos pensar que el suministro de nutrientes para las palmeras se ha visto incrementado al extender las micorrizas el volumen de suelo explorado, y mediante la adquisición de formas de nutrientes que normalmente no están disponibles para las plantas (Brundrett, 2008). Por lo tanto, la combinación de fertilización, particularmente orgánica, y la inoculación con hongos micorrícicos nativos, representa un tipo de manejo bastante prometedor en ejemplares de palmera canaria en condiciones de vivero. La inoculación debe realizarse antes de la germinación de las semillas, puesto que las micorrizas requieren un desarrollo sincronizado de la planta y los hongos, ya que las hifas solo colonizan las raíces jóvenes. La fertilización puede retrasarse a etapas posteriores, una vez las plantas hayan sido trasplantadas a contenedores de mayor volumen.

5. Conclusiones

De las experiencias realizadas en el presente Proyecto de investigación se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Los ejemplares de palmera canaria responden de forma rápida y positiva al uso de fertilizantes químicos de liberación lenta, incrementándose significativamente la producción de biomasa aérea y radicular, probablemente como consecuencia directa de un mejor estado nutricional, particularmente con respecto al nitrógeno, que queda patente en la menor producción de antioxidantes y en mayores concentraciones de clorofila.
- Los fertilizantes orgánicos en forma sólida, aplicados en concentraciones suficientemente altas, igualan o superan los efectos positivos obtenidos con los fertilizantes químicos. Este tipo de fertilización promueve en mayor medida el desarrollo radicular frente al desarrollo de la parte aérea, generando así palmeras más equilibradas en cuanto a la relación sistema aéreo/sistema radicular, que las tratadas con fertilización química.
- En las condiciones de estudio, los ejemplares de palmera canaria han mostrado la capacidad de responder a un suministro heterogéneo de nutrientes en el suelo con un crecimiento compensatorio de la raíz. Este crecimiento compensatorio implica la proliferación de raíces laterales finas dentro de las zonas enriquecidas con nutrientes, compensando así el efecto inhibitorio de la disponibilidad limitada de nutrientes en el desarrollo de raíces finas fuera de estas zonas.
- La aplicación localizada de fertilizantes a determinadas profundidades en el perfil del suelo, puede representar una opción de manejo en campo que permite manipular la distribución de raíces laterales finas en la palmera canaria, promoviendo una arquitectura radicular que incremente la exploración del sistema edáfico y el aprovechamiento de los recursos de agua y nutrientes, colaborando además potencialmente con el control de los procesos erosivos.
- La combinación de fertilización, particularmente orgánica, y la inoculación con hongos micorrízicos durante la germinación de las semillas de palmera canaria, constituye también una práctica de manejo bastante prometedora para la obtención de ejemplares en vivero con un adecuado desarrollo radicular y estado nutricional.

Globalmente, los estudios realizados permiten establecer que el manejo integrado de diferentes técnicas agrológicas, aplicadas en diferentes etapas de crecimiento y condiciones de campo, constituye una estrategia viable para la optimización de la rizogénesis de la palmera canaria. Este hecho podría incrementar las posibilidades de éxito en el establecimiento de ejemplares de palmera en procesos de revegetación, así como incrementar la productividad, la sostenibilidad y la resiliencia de los palmerales en el contexto actual y futuro de cambio climático.

6. Referencias bibliográficas

- Bracke, J., Elsen, A., Adriaenssens, S., Schoeters, L., Vandendriessche, H., Van Labeke, M.C., 2019. Application of Proximal Optical Sensors to Fine-Tune Nitrogen Fertilization: Opportunities for Woody Ornamentals. *Agronomy* 9, 408.
- Broschat, T.K., Elliott, M.L., 2009. Effects of fertilization and microbial inoculants applied at transplanting on the growth of mexican fan palm and queen palm. *HortTechnology* 19, 2, 324-330.
- Broschat, T.K., Moore, K.A., 2010. Effects of fertilization on the growth and quality of container-grown areca palm and Chinese hibiscus during establishment in the landscape. *HortTechnology* 20, 2, 389-394.
- Brundrett, M., 2008. Mycorrhizal associations: The web resource. Australian Center for International Agricultural Research.
- Burylo, M., Rey, F., Mathys, N., and Dutoit, T., 2012. Plant root traits affecting the resistance of soils to concentrated flow erosion, *Earth Surf. Proc. Landf.* 37, 1436-1470.
- Chopart, J.L., Rodrigues, S.R., Carvalho de Azevedo, M., de Conti Medina, C., 2008. Estimating sugarcane root length density through root mapping and orientation modelling. *Plant Soil* 313, 101-112.
- FAO, 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56.
- Faye, A., Sine, B., Chopart, J., Grondin, A., Lucas, M., Diedhiou, A.G., Gantet, P., Cournac, L., Min, D., Audebert, A., Kane, A., Laplaze, L., 2019. Development of a model estimating root length density from root impacts on a soil profile in pearl millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br). Application to measure root system response to water stress in field conditions. *PLoS ONE* 14 (7): e0214182.
- Gutiérrez-Soto, M.V., Torres-Acuña, J., Araya-Alfaro, J.M., 2014. Uso de Winrhizo® en la cuantificación de las raíces y su aplicación en la palma aceitera (*Elaeis guineensis* JACQ.). *Agronomía Mesoamericana* 25, 181-188.
- Hewitt, E.J., 1952. Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition. *Commonw. Bur. Hort. & Pl. Crops Tech. Commun.* 22:189.
- Jones, B. and Ljung, K., 2012. Subterranean space exploration: the development of root system architecture. *Current Opin. Plant Biol.* 15, 97-102.
- Ola, A., Dodd, I.C., Quinton, J.N., 2015. Can we manipulate root system architecture to control soil erosion? *Soil* 1, 603-612.
- Pohl, M., Alig, D., Körner, C., and Rixen, C., 2009. Higher plant diversity enhances soil stability in disturbed alpine ecosystems. *Plant Soil* 324, 91-102.
- Robinson, D., 1994. The response of plants to non-uniform supplies of nutrients. *New Phytologist*, 127, 635-674.

7. Figuras



Figura 1. Modelo de contenedor utilizado en el *Experimento 1* con ejemplar recién trasplantado (arriba); y visión general de la experiencia (abajo).

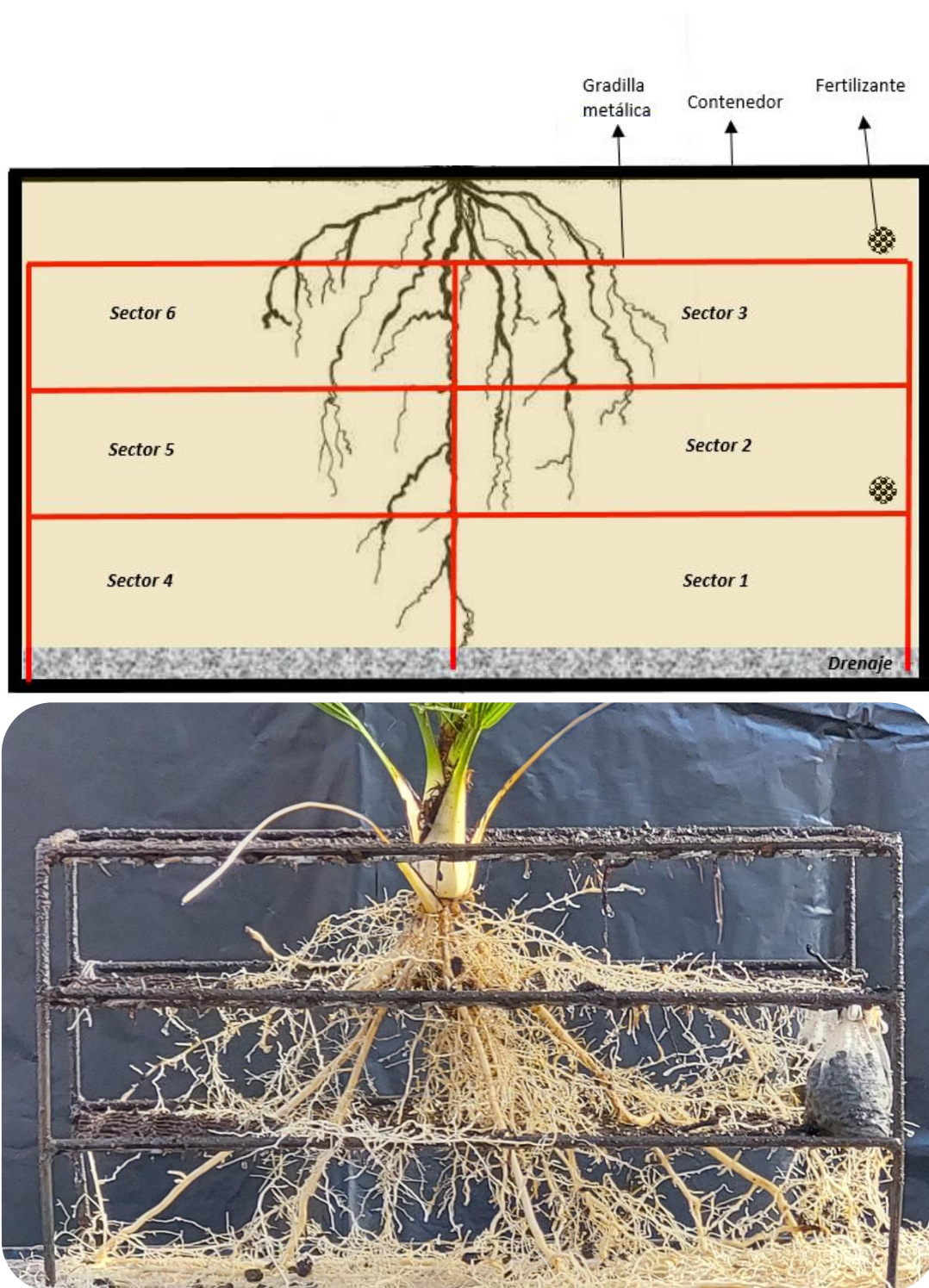


Figura 2. Esquema (arriba) de la sectorización realizada en los contenedores mediante una gradilla metálica; y distribución radicular (abajo) de un ejemplar de palmera una vez retirado el sustrato en el *Experimento 2* (se puede observar las dos bolsas de compost aplicadas en el sector 2 en el lado derecho de la imagen).

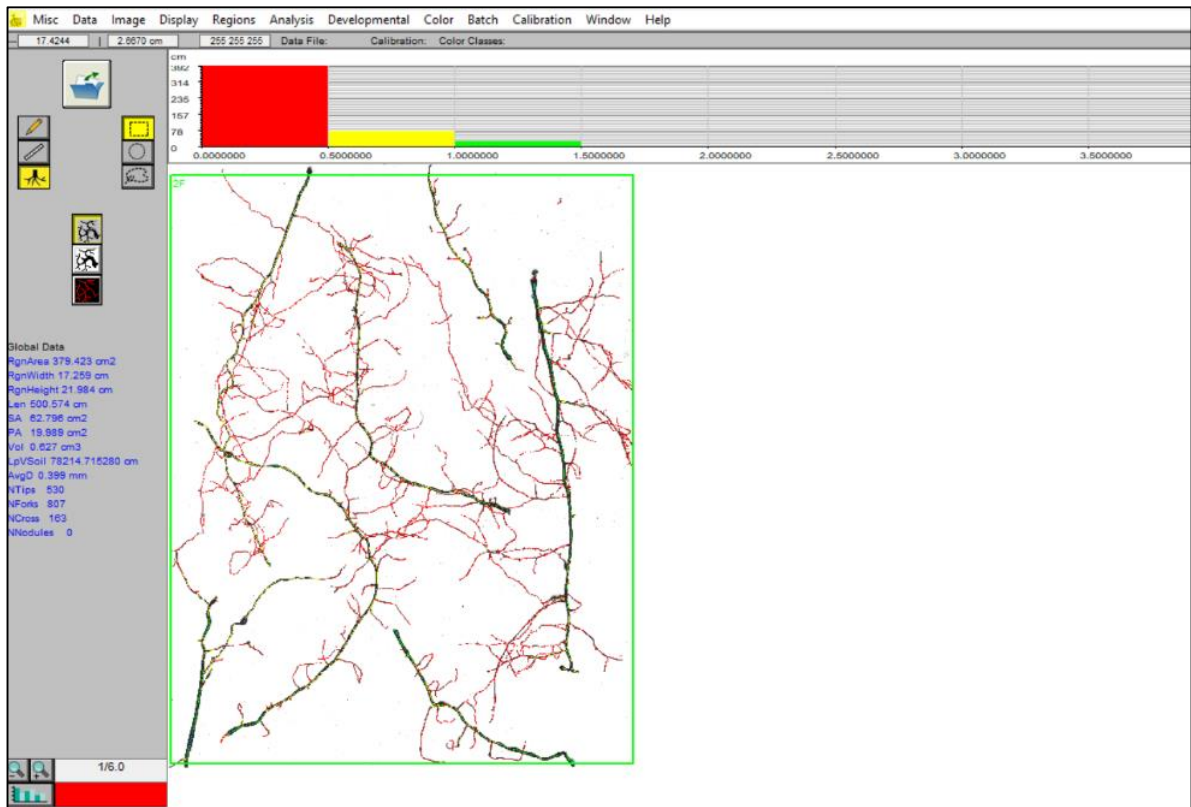


Figura 3. Equipo utilizado en el *Experimento 2* para la determinación de la densidad de longitud de raíces (arriba izquierda); cubeta con muestra de raíces para realizar el escaneado (arriba derecha); y output del software WinRhizo® (abajo).

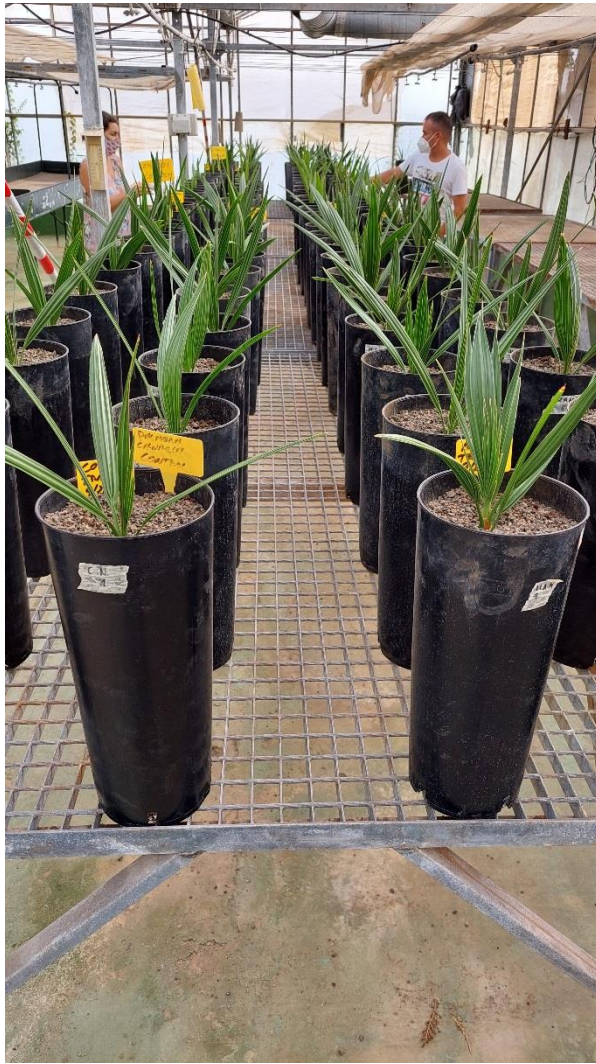


Figura 4. Visión general de la experiencia (izquierda); y sistema radicular de un ejemplar al final del periodo de estudio (derecha), en el *Experimento 3*.

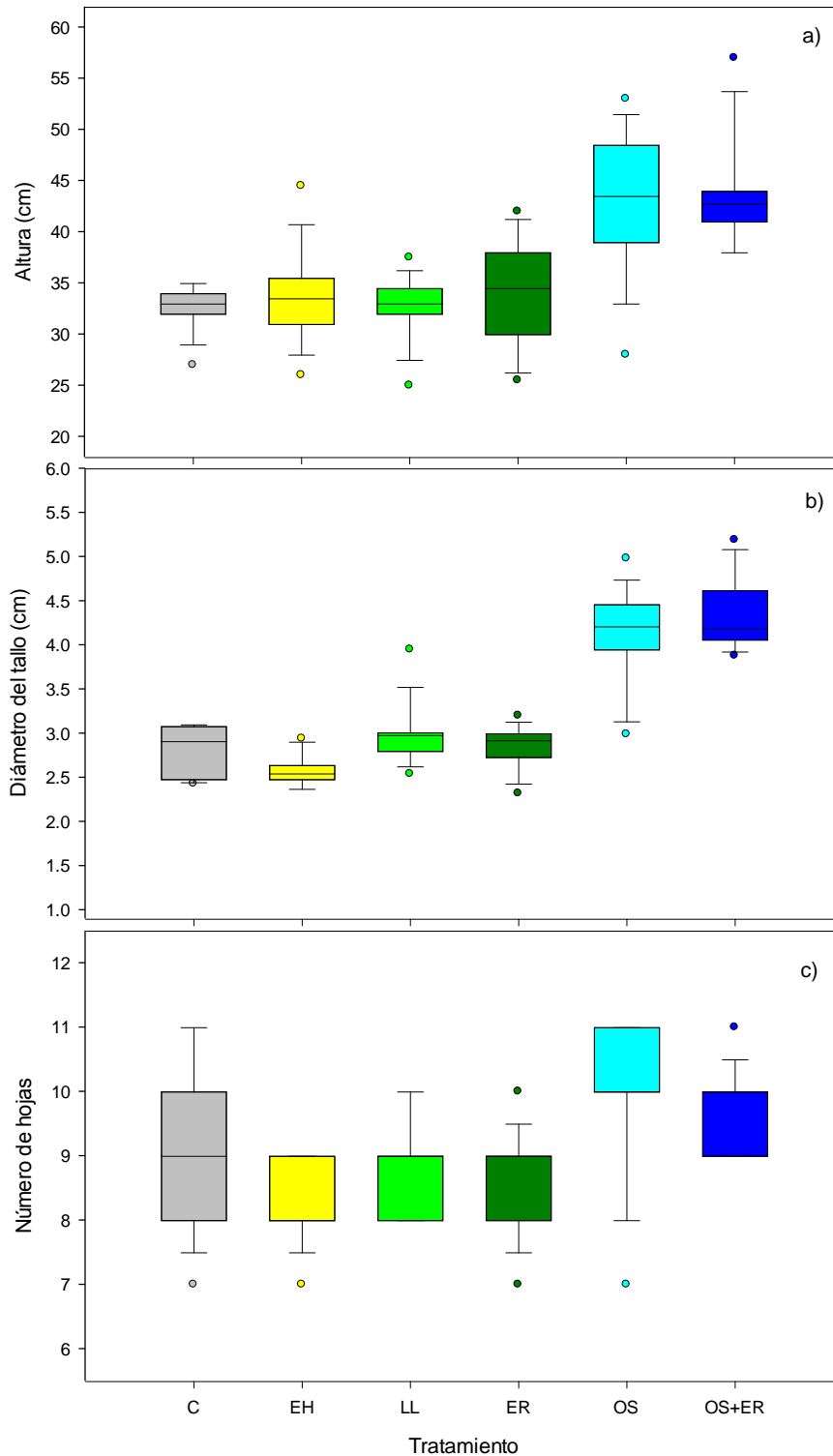


Figura 5. Parámetros morfológicos de plantas de palmera canaria bajo diferentes tratamientos, transcurridos 8 meses desde la plantación; a) altura máxima con las hojas extendidas; b) diámetro de la base del tallo; y c) número de hojas emitidas; C = control; EH = estrés hídrico; LL = lixiviado de humus de lombriz; ER = estimulante radicular; OS = osmocote; OS+ER = osmocote más estimulante radicular; n = 10; las cajas representan los percentiles 10, 25, 50, 75 y 90; los círculos aislados representan valores atípicos.

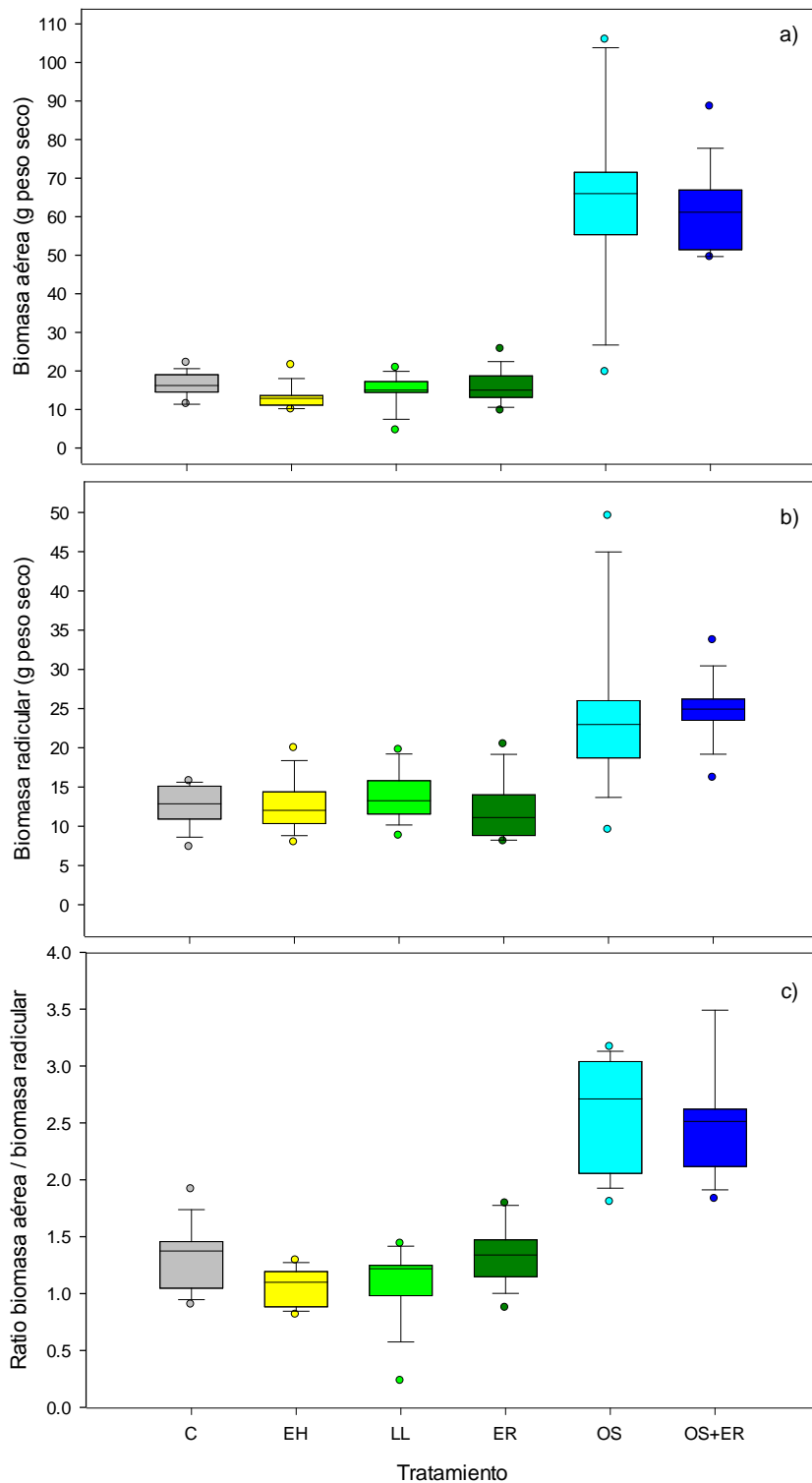


Figura 6. Producción de biomasa, expresada como materia seca, en ejemplares de palmera canaria bajo diferentes tratamientos, transcurridos 8 meses desde la plantación; a) biomasa aérea; b) biomasa radicular; y c) relación biomasa aérea / biomasa radicular; C = control; EH = estrés hídrico; LL = lixiviado de humus de lombriz; ER = estimulante radicular; OS = osmocote; OS+ER = osmocote más estimulante radicular; n = 10; las cajas representan los percentiles 10, 25, 50, 75 y 90; los círculos aislados representan valores atípicos.

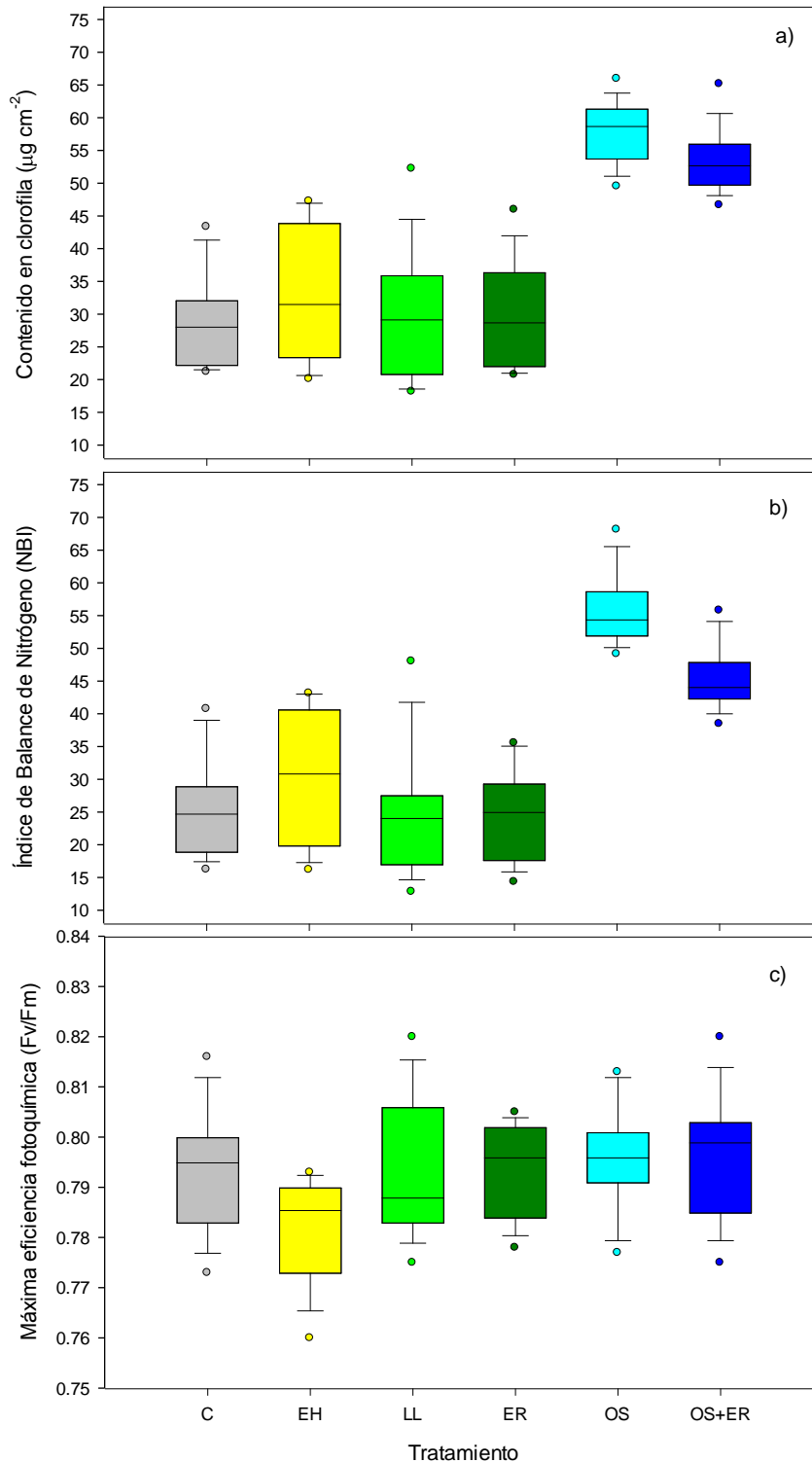


Figura 7. Respuestas fisiológicas en ejemplares de palmera canaria bajo diferentes tratamientos, transcurridos 8 meses desde la plantación; a) clorofila total; b) NBI; y c) eficiencia fotoquímica; C = control; EH = estrés hídrico; LL = lixiviado de humus de lombriz; ER = estimulante radicular; OS = osmocote; OS+ER = osmocote más estimulante radicular; n = 10; las cajas representan los percentiles 10, 25, 50, 75 y 90; los círculos aislados representan valores atípicos.

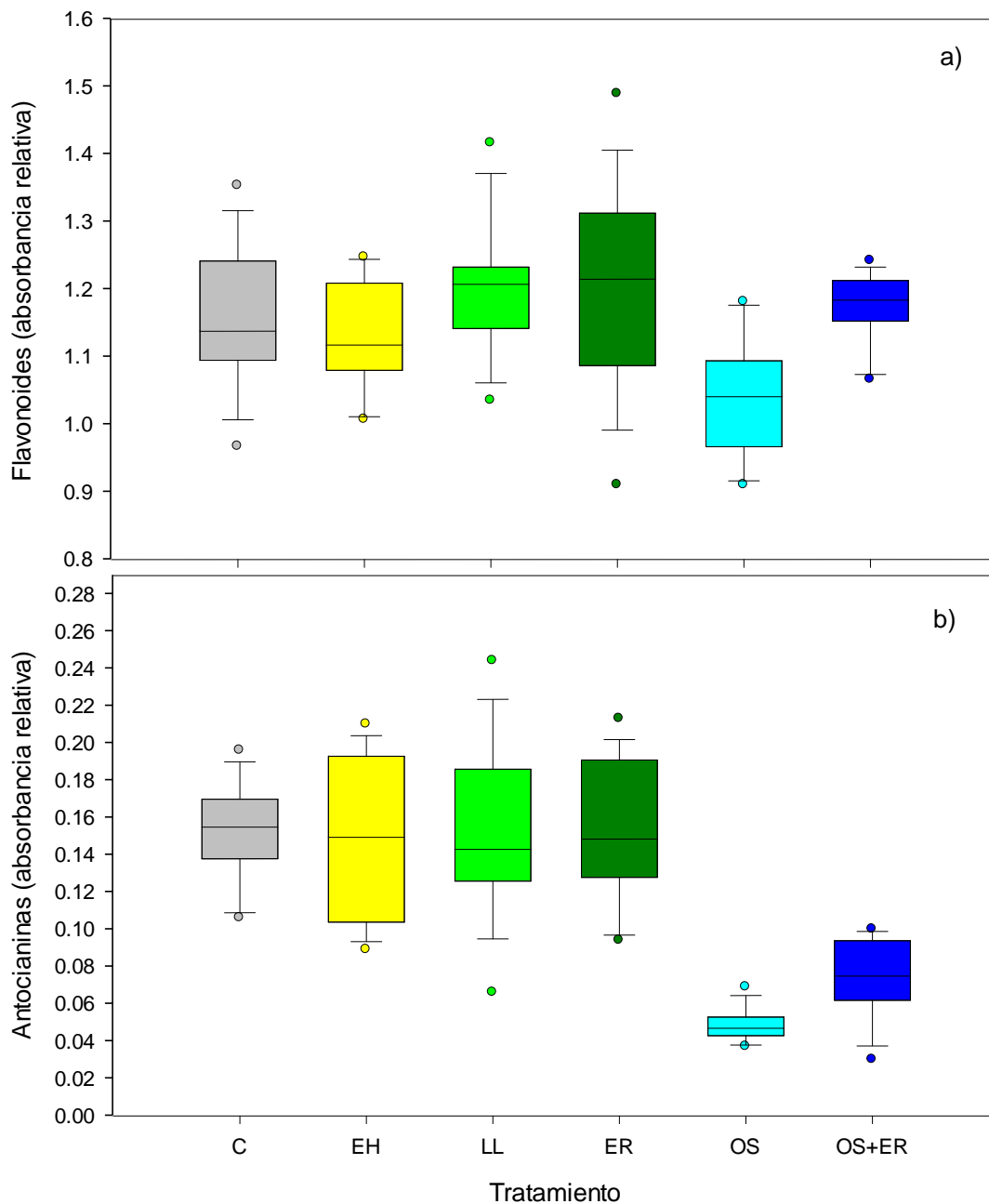


Figura 8. Respuestas fisiológicas en ejemplares de palmera canaria bajo diferentes tratamientos, transcurridos 8 meses desde la plantación; a) contenido en flavonoides en unidades de absorbancia relativa; b) contenido en antocianinas en unidades de absorbancia relativa; C = control; EH = estrés hídrico; LL = lixiviado de humus de lombriz; ER = estimulante radicular; OS = osmocote; OS+ER = osmocote más estimulante radicular; n = 10; las cajas representan los percentiles 10, 25, 50, 75 y 90; los círculos aislados representan valores atípicos.



Figura 9. Ejemplares de palmera canaria de 22 meses de edad bajo fertilización con osmocote (arriba), y control (abajo).



Figura 10. Sistema radicular de ejemplares de palmera canaria de 16 meses de edad bajo fertilización con osmocote (arriba izquierda y abajo segunda por la izquierda), y control (arriba derecha y abajo segunda por la derecha).

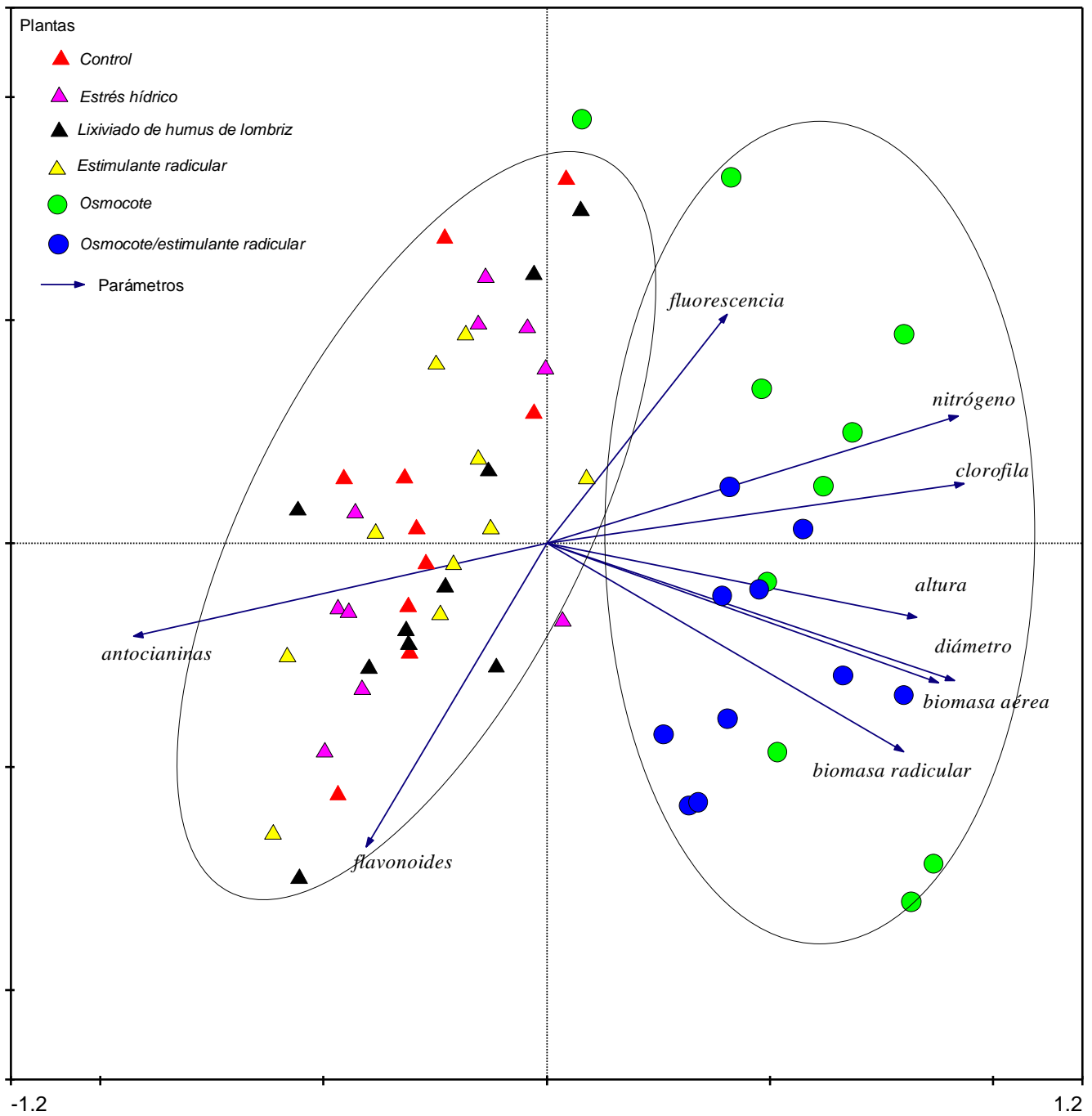


Figura 11. Ordenación de los ejemplares de palmera canaria bajo diferentes tratamientos, atendiendo al resultado de los parámetros analizados utilizando un Análisis de Componentes Principales; $n = 60$; valores del eje I y II, 0.649 y 0.145, respectivamente. *Interpretación del gráfico:* cada flecha apunta en la dirección de aumento del valor para el correspondiente parámetro. Los ángulos entre flechas indican correlaciones entre parámetros. La distancia entre muestras (símbolos) es proporcional a la diferencia de composición entre ellas. Las proyecciones perpendiculares desde los símbolos sobre las flechas indican la abundancia de ese parámetro en muestras individuales. Los círculos agrupan conjuntos de muestras relativamente homogéneos.

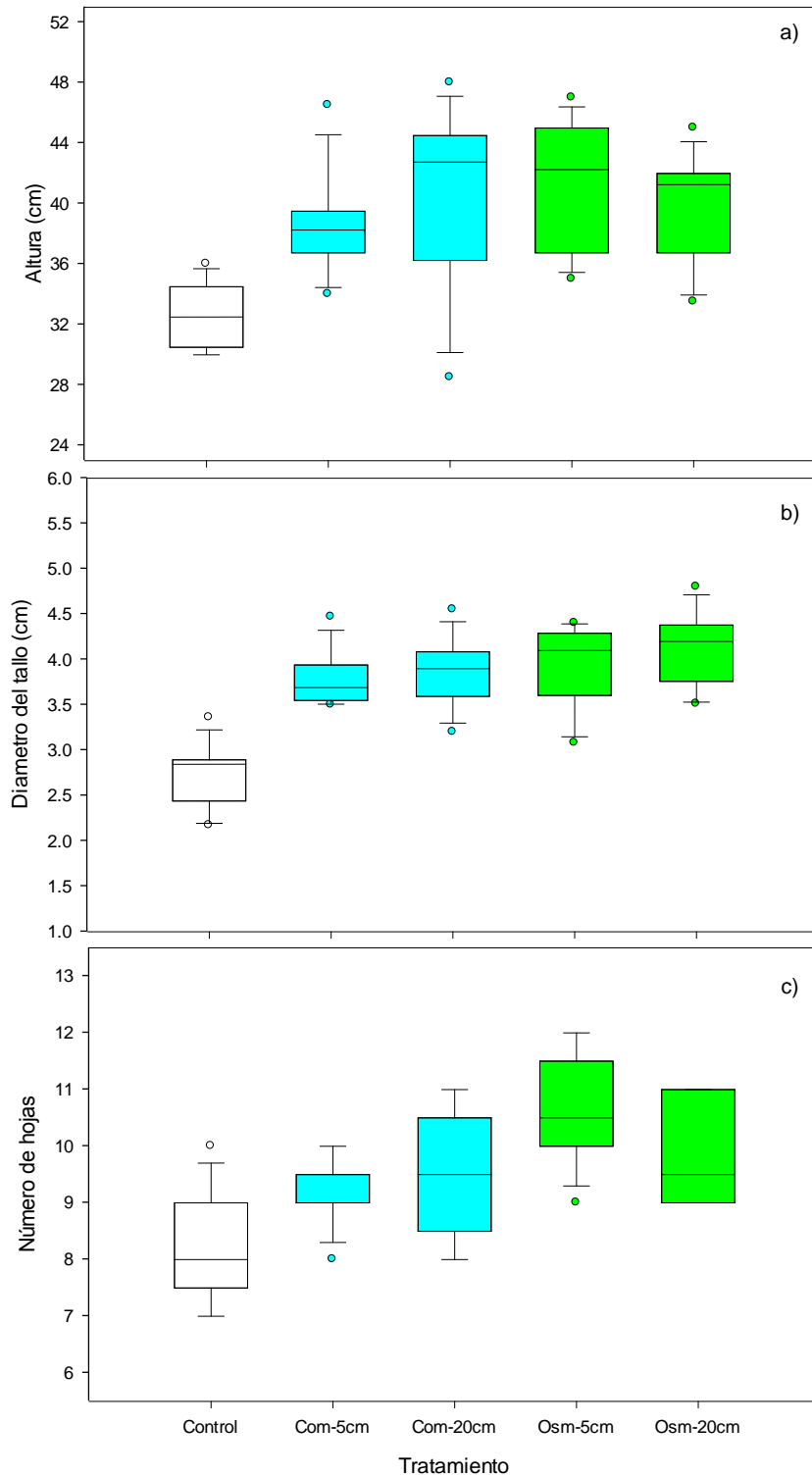


Figura 12. Parámetros morfológicos de plantas de palmera canaria bajo diferentes tratamientos, transcurridos 8 meses desde la plantación; a) altura máxima con las hojas extendidas; b) diámetro de la base del tallo; y c) número de hojas emitidas; Com-5cm y Com-20cm, compost aplicado a 5 y 20 cm de profundidad, respectivamente; Osm-5cm y Osm-20cm, osmocote aplicado a 5 y 20 cm de profundidad respectivamente; n = 8; las cajas representan los percentiles 10, 25, 50, 75 y 90; los círculos aislados representan valores atípicos.

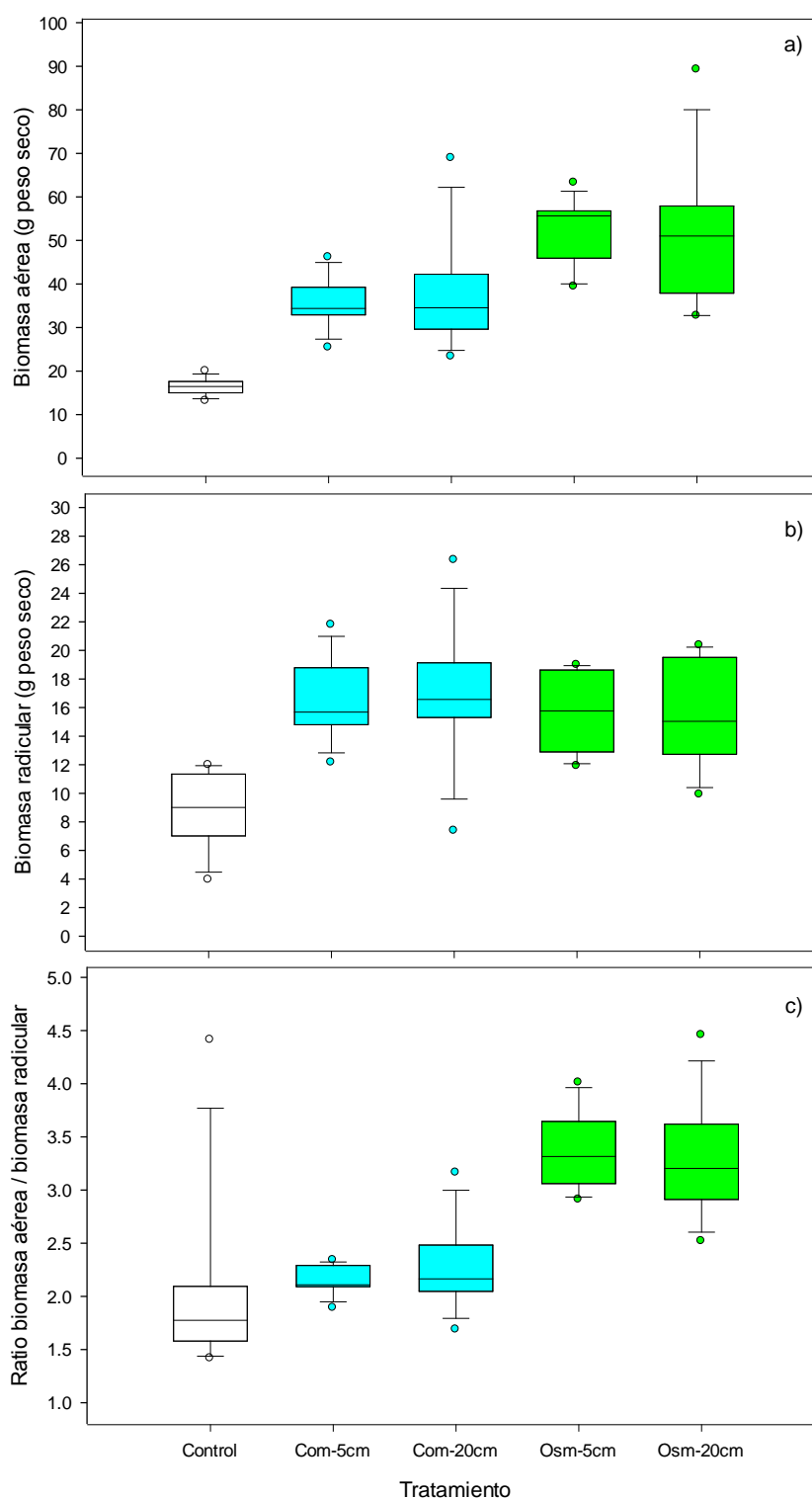


Figura 13. Producción de biomasa expresada como materia seca en ejemplares de palmera canaria bajo diferentes tratamientos, transcurridos 8 meses desde la plantación; a) biomasa aérea; b) biomasa radicular; y c) relación biomasa aérea / biomasa radicular; Com-5cm y Com-20cm, compost aplicado a 5 y 20 cm de profundidad, respectivamente; Osm-5cm y Osm-20cm, osmocote aplicado a 5 y 20 cm de profundidad, respectivamente; n = 8; las cajas representan los percentiles 10, 25, 50, 75 y 90; los círculos aislados representan valores atípicos.

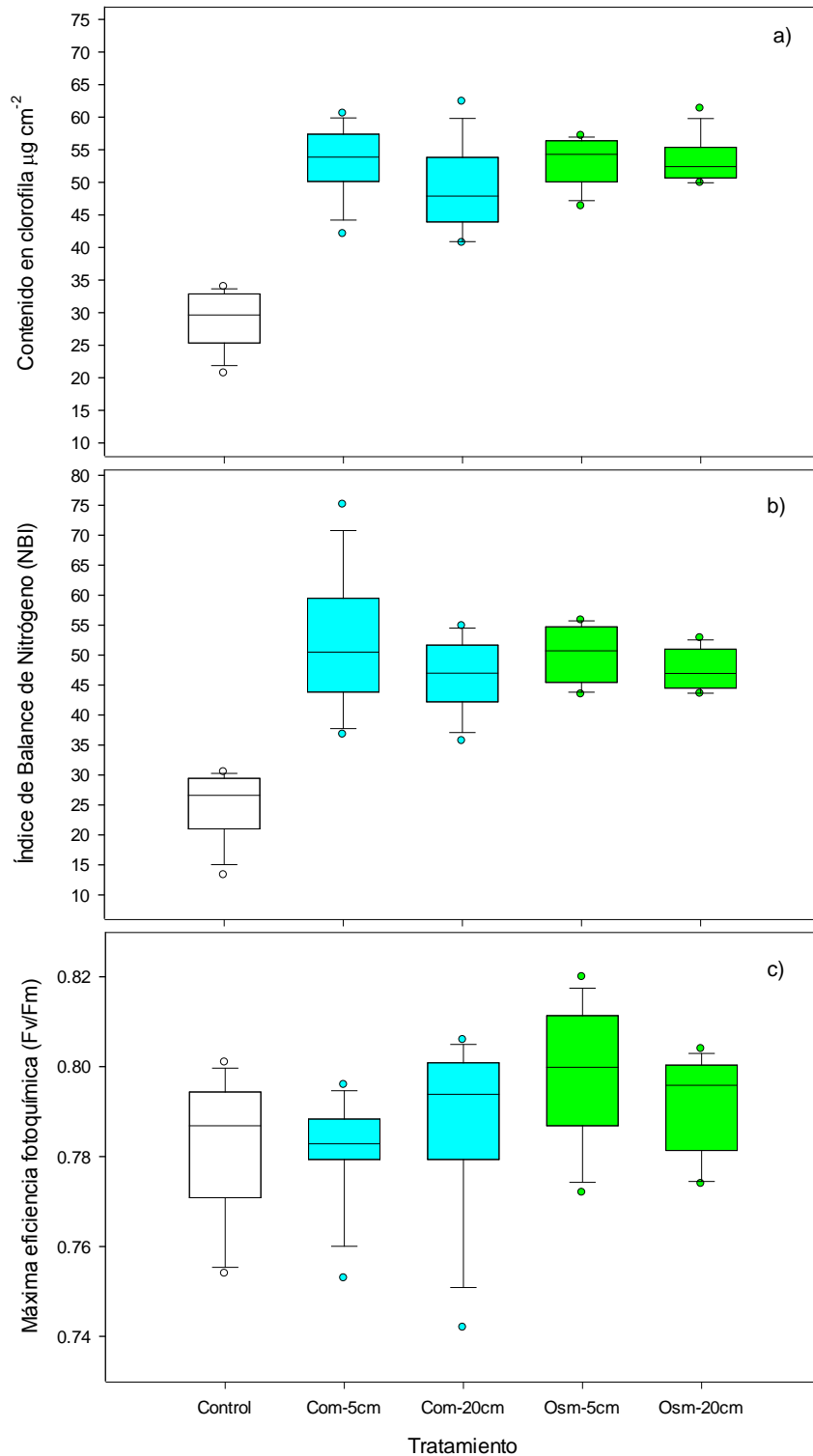


Figura 14. Respuestas fisiológicas en ejemplares de palmera canaria bajo diferentes tratamientos, transcurridos 8 meses desde la plantación; a) clorofila total; b) NBI; y c) eficiencia fotoquímica; Com-5cm y Com-20cm, compost aplicado a 5 y 20 cm de profundidad respectivamente; Osm-5cm y Osm-20cm, osmocote aplicado a 5 y 20 cm de profundidad respectivamente; n = 8; las cajas representan los percentiles 10, 25, 50, 75 y 90; los círculos aislados representan valores atípicos.

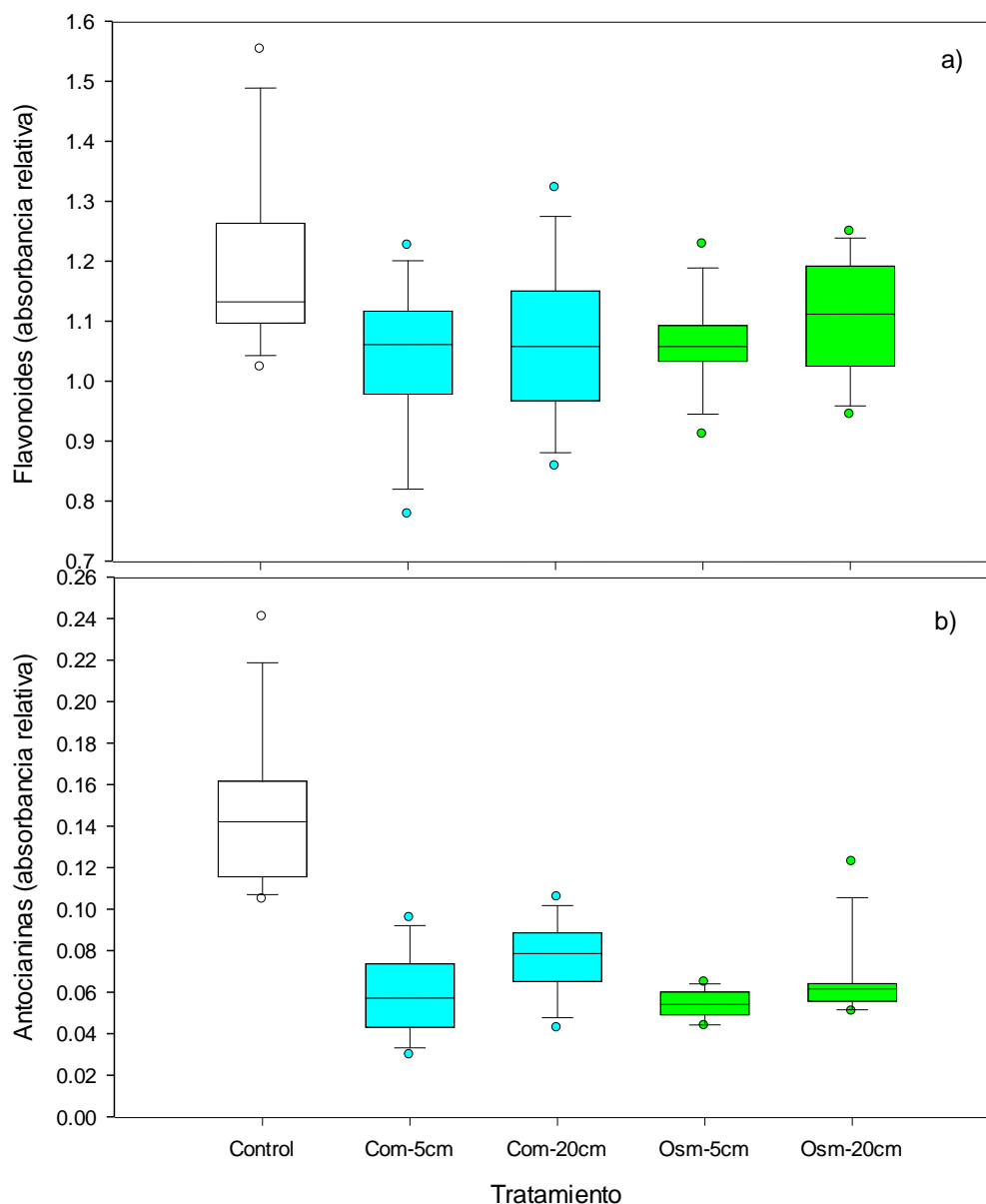


Figura 15. Respuestas fisiológicas en ejemplares de palmera canaria bajo diferentes tratamientos, transcurridos 8 meses desde la plantación; a) contenido en flavonoides en unidades de absorbancia relativa; b) contenido en antocianinas en unidades de absorbancia relativa; Com-5cm y Com-20cm, compost aplicado a 5 y 20 cm de profundidad respectivamente; Osm-5cm y Osm-20cm, osmocote aplicado a 5 y 20 cm de profundidad respectivamente; n = 8; las cajas representan los percentiles 10, 25, 50, 75 y 90; los círculos aislados representan valores atípicos.

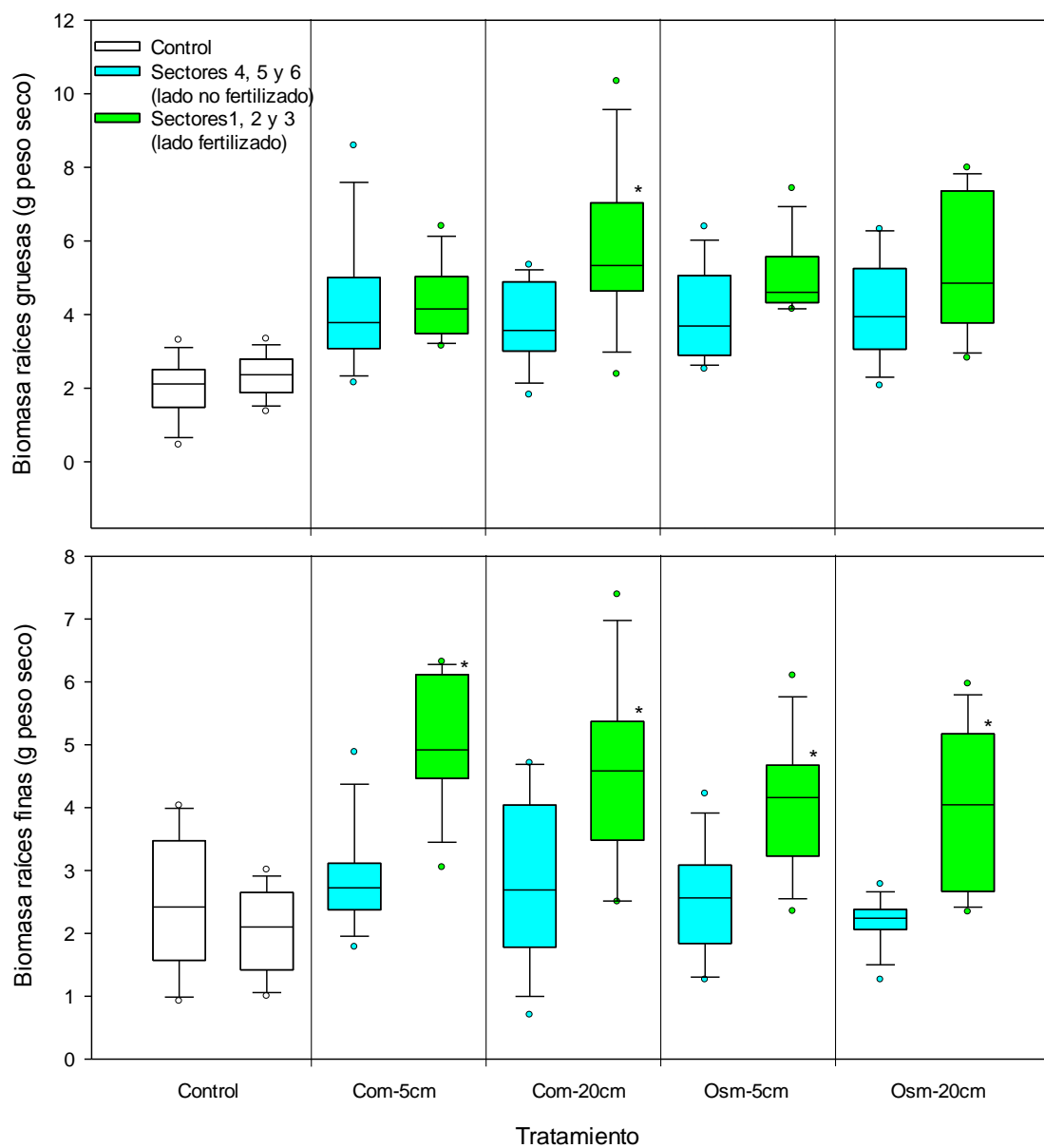


Figura 16. Producción de biomasa radicular en el lado fertilizado y no fertilizado de los contenedores, transcurridos 8 meses desde la plantación; arriba, biomasa de raíces gruesas (> 2mm de diámetro); abajo, biomasa de raíces finas (< 2mm de diámetro); Com-5cm y Com-20cm, compost aplicado a 5 y 20 cm de profundidad respectivamente; Osm-5cm y Osm-20cm, osmocote aplicado a 5 y 20 cm de profundidad respectivamente; n = 8; las cajas representan los percentiles 10, 25, 50, 75 y 90; los círculos aislados representan valores atípicos; los asteriscos indican diferencias significativas entre el lado con y sin fertilizante.

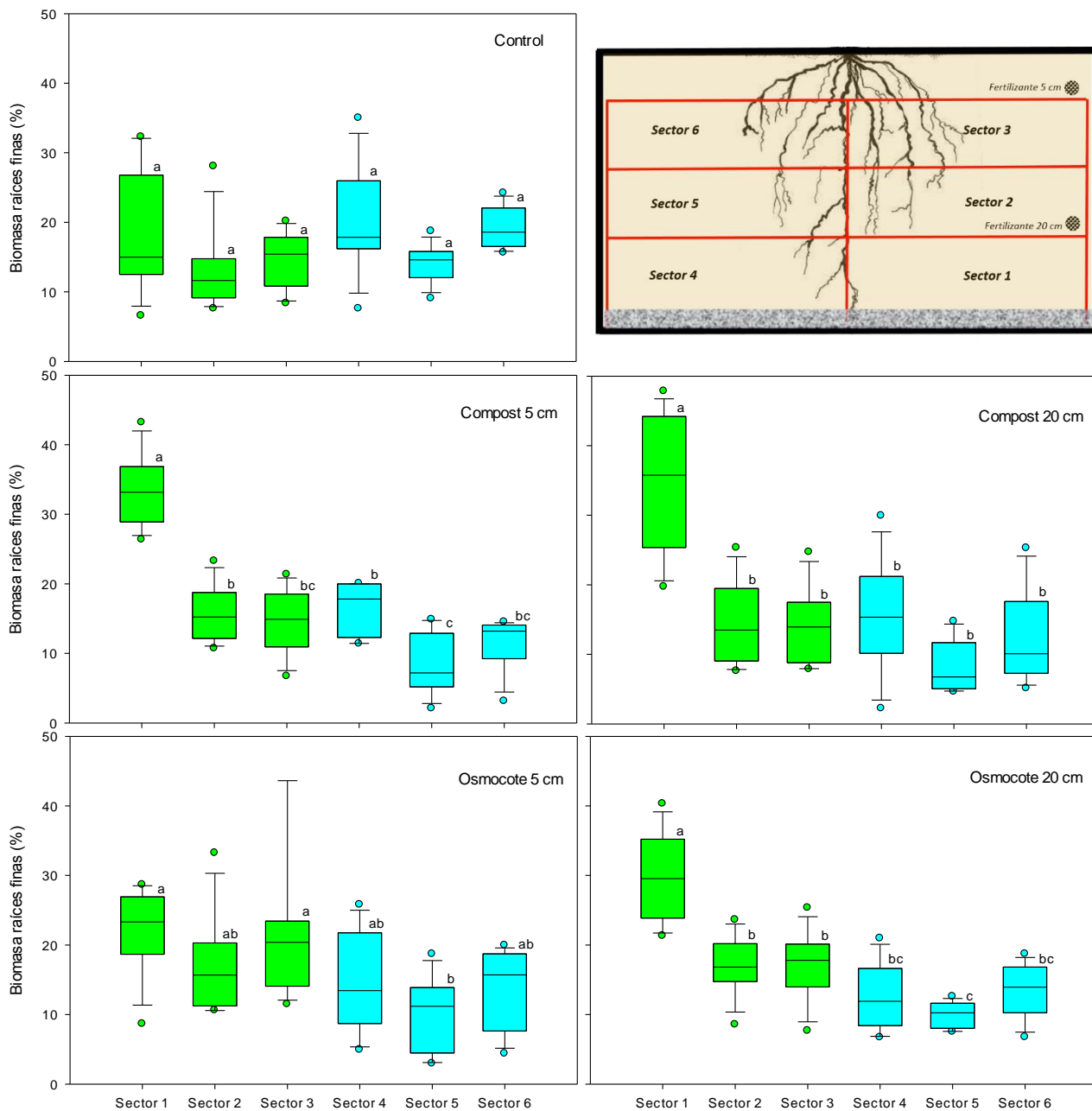


Figura 17. Porcentaje de biomasa radicular (raíces finas <math>< 2\text{ mm}</math> de diámetro) expresada como materia seca en los 6 sectores establecidos en cada contenedor bajo diferentes tratamientos de fertilización localizada, transcurridos 8 meses desde la plantación; Compost 5cm y Compost 20cm, compost aplicado a 5 y 20 cm de profundidad respectivamente; Osmocote 5cm y Osmocote 20cm, osmocote aplicado a 5 y 20 cm de profundidad respectivamente; $n = 8$; las cajas representan los percentiles 10, 25, 50, 75 y 90; los círculos aislados representan valores atípicos; letras diferentes en las cajas indican diferencias significativas entre los sectores analizados.

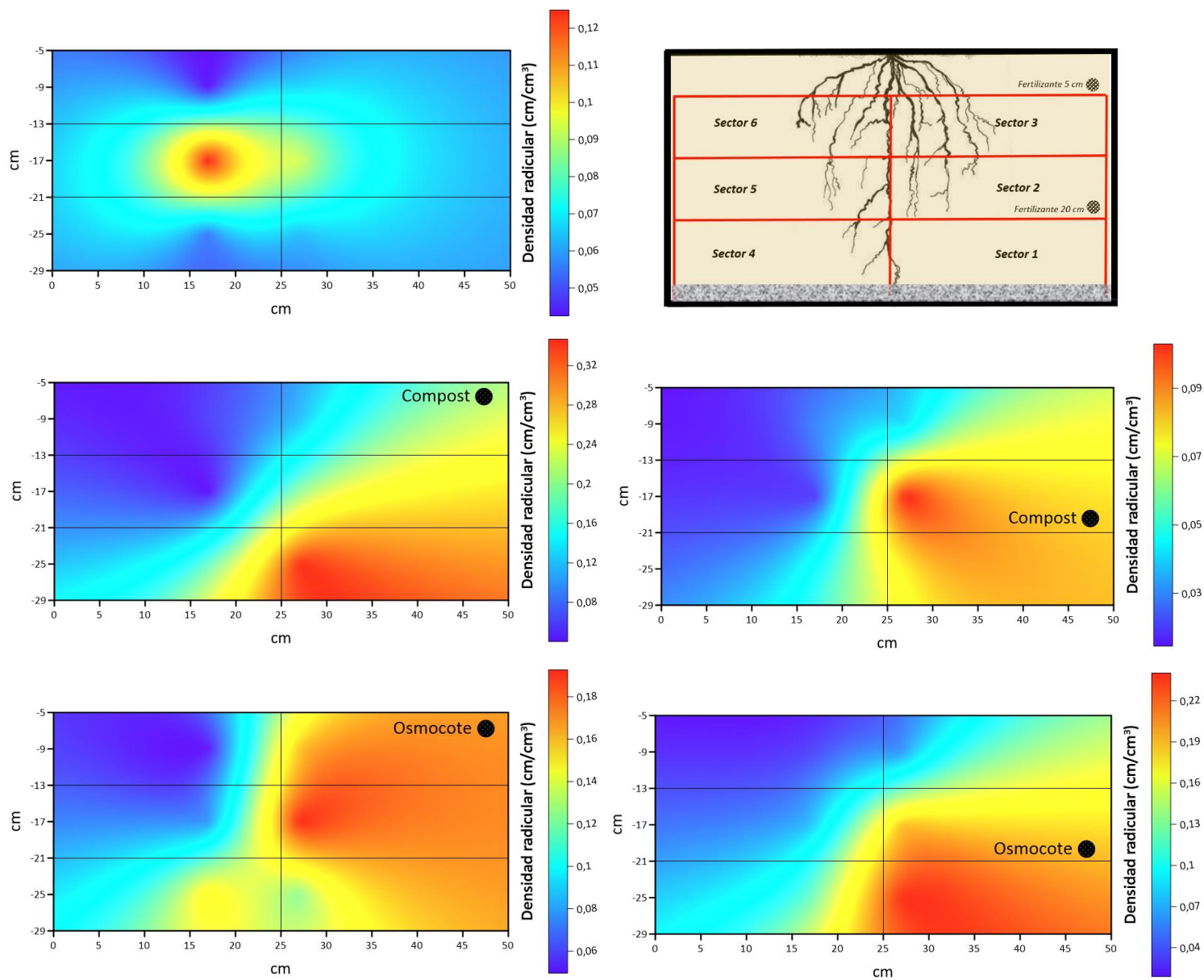


Figura 18. Distribución de la densidad de longitud radicular (DLR; raíces finas < 2 mm) en ejemplares de palmera canaria bajo diferentes tratamientos de fertilización localizada, transcurridos 8 meses desde la plantación; arriba derecha, esquema de sectorización del contenedor y posibles localizaciones del fertilizante; arriba izquierda, control; izquierda centro y abajo, fertilización localizada a 5 cm de profundidad de compost y osmocote, respectivamente; derecha centro y abajo, fertilización localizada a 20 cm de profundidad de compost y osmocote, respectivamente.

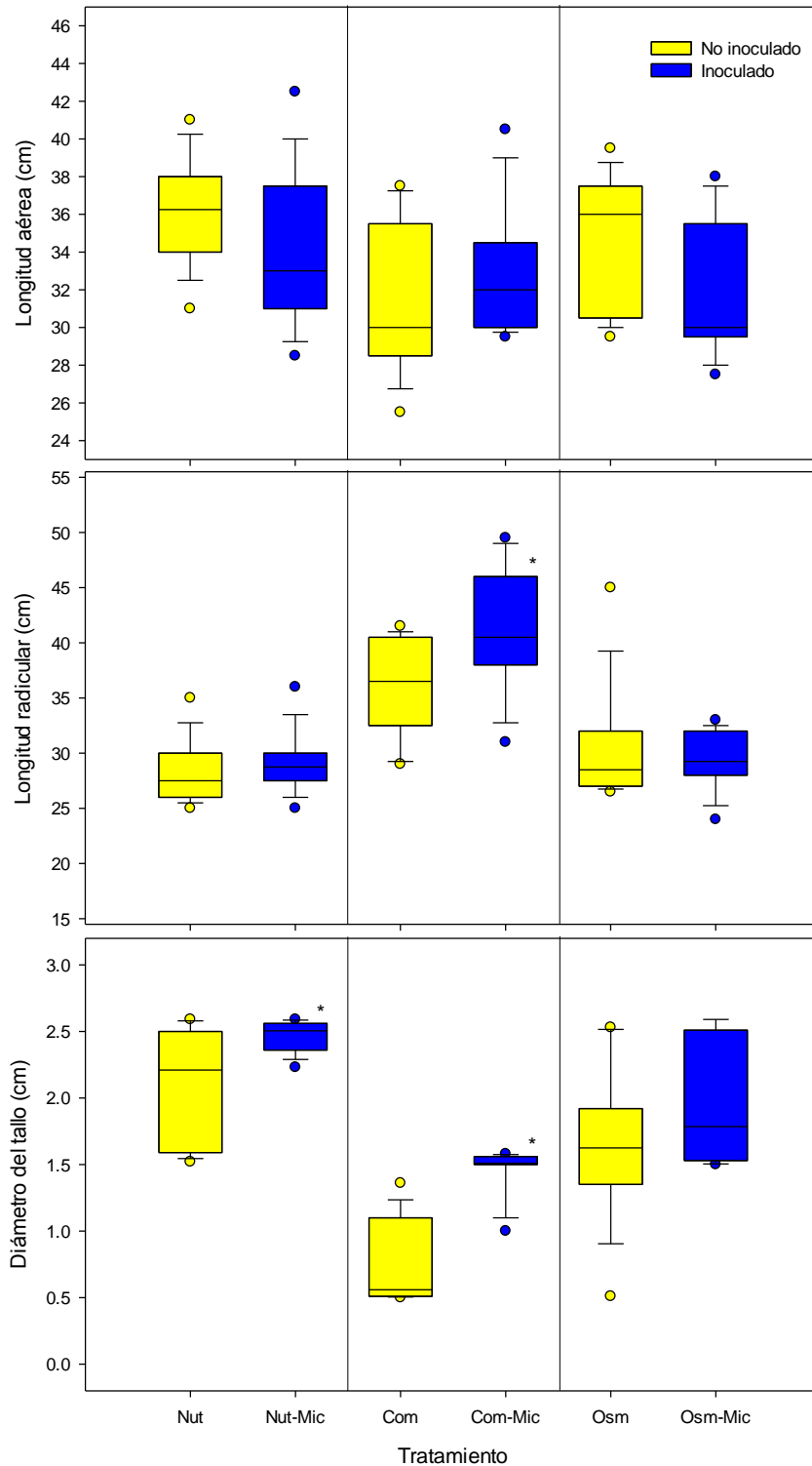


Figura 19. Parámetros morfológicos de plantas de palmera canaria bajo diferentes tratamientos, transcurridos 10 meses desde la germinación; Nut, solución nutritiva; Com, compost; Osm, osmocote; Mic, micorrización; n = 10; las cajas representan los percentiles 10, 25, 50, 75 y 90; los círculos aislados representan valores atípicos. Los asteriscos indican diferencias significativas entre plantas micorrizadas y no micorrizadas.

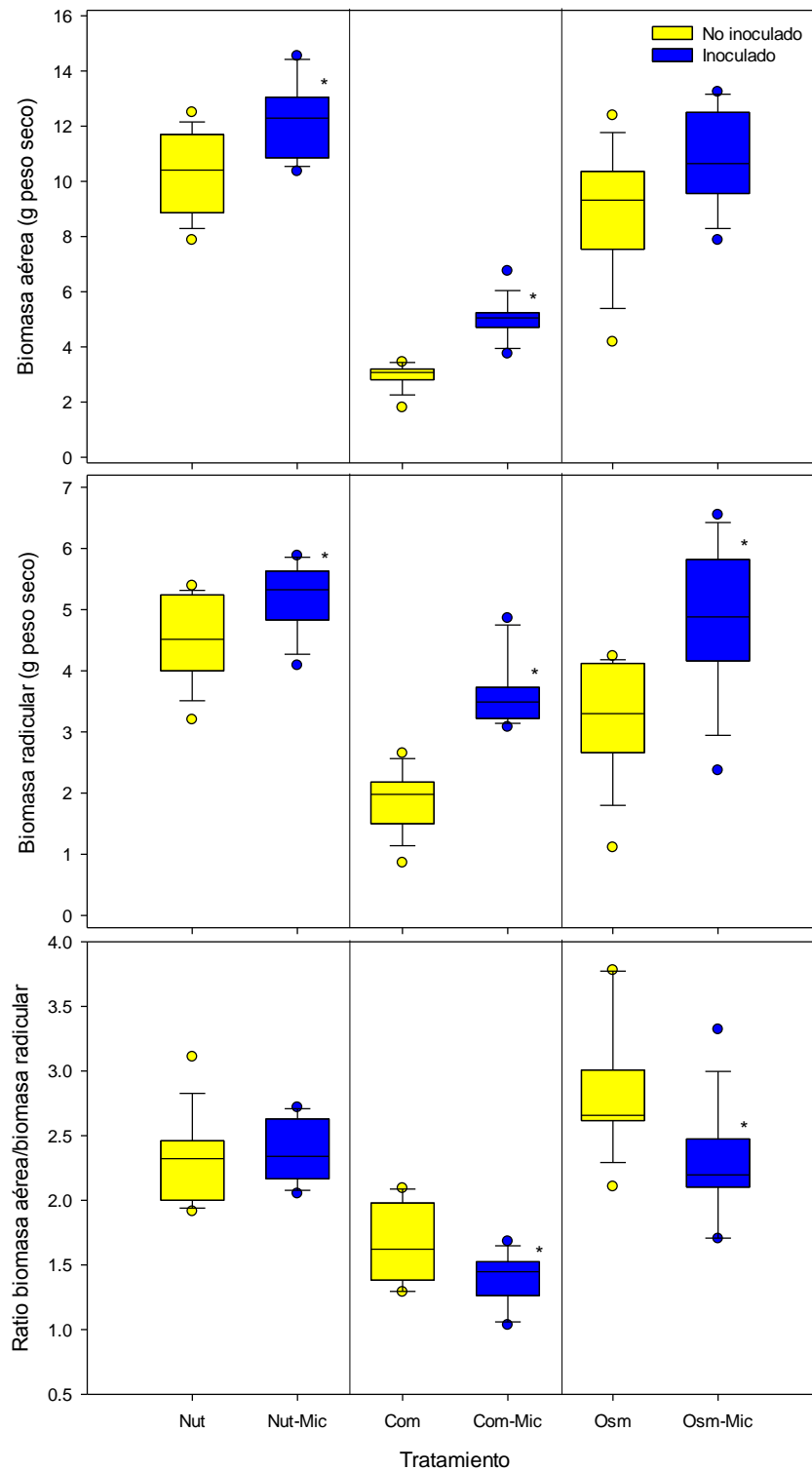


Figura 20. Producción de biomasa en plantas de palmera canaria bajo diferentes tratamientos, transcurridos 10 meses desde la germinación; Nut, solución nutritiva; Com, compost; Osm, osmocote; Mic, micorrización; n = 10; las cajas representan los percentiles 10, 25, 50, 75 y 90; los círculos aislados representan valores atípicos. Los asteriscos indican diferencias significativas entre plantas micorrizadas y no micorrizadas.



Figura 21. Ejemplares representativos de cada uno de los tratamientos evaluados en el *Experimento 3*, agrupados por tipo de fertilizante utilizado.



Figura 22. Ejemplares representativos de cada uno de los tratamientos evaluados en el Experimento 3.

Autores

*Francisco Javier Díaz Peña
M^a Carmen Jaizme Vega
Jorge Alfredo Reyes Betancort
Carlos Samarín Bello
Raquel Pérez Reverón*



Agradecimientos

Los autores quieren expresar su agradecimiento al personal técnico del ICIA, Valle Guerra, Tenerife, por su colaboración y disponibilidad durante el desarrollo de este Proyecto. Quieren agradecer también la colaboración del personal técnico del laboratorio de Edafología del Departamento de Biología Animal, Edafología y Geología de la Universidad de La Laguna en las tareas de determinaciones analíticas.



