

Deficiencias minerales en plantas de una savia de dos especies de frondosas mediterráneas (*Quercus suber* L. y *Ceratonia siliqua* L.)

R. M. Navarro Cerrillo*¹, M. A. Arribas García, V. Gallegos Pérula¹ y E. Alcántara Vara²

¹ Departamento de Ingeniería Forestal. ² Departamento de Agronomía. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes. Universidad de Córdoba. Apdo. 3048. 14080 Córdoba. España

Resumen

Las deficiencias minerales son comunes en el cultivo de brinzales de especies forestales en vivero, así como durante el establecimiento inicial de las plantaciones. El presente trabajo tiene por objetivo el estudio de los efectos de las deficiencias de nitrógeno, fósforo, potasio y hierro en dos especies de frondosas mediterráneas: *Quercus suber* L. y *Ceratonia siliqua* L. El ensayo se realizó en cultivo hidropónico en medio líquido, utilizando soluciones nutritivas deficientes en N, P, K y Fe y una solución control. El cultivo se mantuvo durante 139 días para *Quercus suber* y 190 días para *Ceratonia siliqua* en un umbráculo con 50% de sombra. Durante este periodo se determinaron atributos morfológicos (altura, peso seco de parte aérea y de raíz) y fisiológicos (contenido relativo de clorofila y concentración de nutrientes en hojas), así como los síntomas visibles provocados por las respectivas carencias nutritivas. Las deficiencias nutritivas afectaron a los atributos morfológicos y fisiológicos, y en algunos casos aparecieron síntomas en hojas. No obstante, los síntomas visuales no parecen ser un método de diagnóstico muy preciso para las especies estudiadas, salvo en el caso de la deficiencia de Fe. Las variaciones en el crecimiento y las concentraciones de nutrientes en hojas han mostrado una mayor sensibilidad, por lo que los estudios alométricos y de nutrición pueden representar alternativas más precisas para los estudios nutricionales de especies de frondosas mediterráneas. El contenido relativo de clorofila (SPAD) también puede ser de utilidad en el diagnóstico de algunas de las deficiencias nutritivas, si se calibran sus valores para cada especie.

Palabras clave: *Quercus suber* L., *Ceratonia siliqua* L., nutrición mineral, síntomas de deficiencias.

Abstract

Mineral deficiencies in seedlings of two Mediterranean hardwood species

Mineral deficiencies are common during the seedling growth in forestry nurseries, as well as during the initial establishment of the plantations. The aim of this work was to study the effects of nitrogen, phosphorus, potassium and iron deficiencies in two Mediterranean hardwood species: *Quercus suber* L. and *Ceratonia siliqua* L. The test was made in hydroponic liquid culture, using solutions lacking N, P, K or Fe and a control solution. The test lasted 139 days for *Quercus suber* and 190 days for *Ceratonia siliqua*, and was developed with 50% of shade. During this period, morphological attributes (height, dry weight of aerial part and root) and physiological attributes (relative chlorophyll content and nutrient concentration in leaves) were determined, as well as the visible symptoms caused by the respective nutrient deficiencies. Nutrient deficiencies affected morphological and physiological attributes, and in some cases visual symptoms appeared. In addition, other determinations like relative chlorophyll content (SPAD) and nutrient foliar concentration are suggested to assure a correct diagnosis.

Key words: *Quercus suber* L., *Ceratonia siliqua* L., nutrition, deficiencies symptoms, nutrient foliar concentration.

Introducción

El aumento de la demanda de especies forestales por parte de los reproductores ha obligado a los viveros a la

producción de cantidades importantes de nuevas especies cuyo cultivo, hasta ahora, había tenido poca tradición, lo que ha fomentado la investigación sobre el ciclo de cultivo de estas especies (Navarro *et al.*, 1998). Una planta forestal de calidad será aquella capaz de alcanzar unas expectativas determinadas en su establecimiento (supervivencia y crecimiento) en un lugar de repoblación concreto (Duryea, 1985; Navarro *et al.*, 1998).

* Autor para la correspondencia: ir1nacer@uco.es
ir2gapev@uco.es

Recibido: 29-01-02; Aceptado: 20-11-02.

Las características que definen la calidad de la planta se dividen en atributos materiales, que pueden medirse directamente y que pueden ser morfológicos y fisiológicos, y en atributos de respuesta, que tratan de predecir su respuesta en el terreno, sometiendo la planta a condiciones que simulan el estrés de plantación (Puttonen, 1997). Uno de los atributos fisiológicos más importantes es el contenido de nutrientes minerales de la planta, ya que un buen balance nutritivo produce una planta de calidad (Timmer *et al.*, 1991; van den Driessche, 1991; Marschner *et al.*, 1996; Timmer, 1997). La composición mineral de la planta es de gran importancia para la supervivencia postransplante pues en las primeras etapas no es capaz de aprovechar los nutrientes del suelo y ha de recurrir a los acumulados en sus propios tejidos en la fase de vivero. El nivel de nutrientes minerales en hoja y raíz, y por tanto, su crecimiento, puede regularse a través de la fertilización (Landis, 1989).

El diagnóstico del estado nutritivo se ha realizado tradicionalmente utilizando distintas técnicas como el análisis de los tejidos, la observación de los síntomas visuales y el análisis del suelo, junto con el conocimiento del régimen de fertilización que se sigue en el vivero (Bould, 1983; Marschner, 1986). Actualmente se han desarrollado nuevos procedimientos de diagnóstico basados en tests bioquímicos y análisis combinados de sustrato-agua-planta (Mathers, 2000). El uso de los síntomas visuales como diagnóstico asume que el aumento del estrés nutricional puede dar lugar a cambios visibles, en particular en la hoja y en la raíz (Marschner, 1986; Timmer, 1991; Mathers, 2000).

Algunos autores han intentado relacionar los síntomas visuales con deficiencias nutritivas mediante cultivo hidropónico, donde se suministran todos los nutrientes adecuadamente excepto el nutriente en cuestión, complementando esta información con la medición de atributos morfológicos, el análisis de los tejidos y, en algunos casos, con fotografías ilustrativas (Marcos y Marzo, 1966, 1968, 1971; Dell, 1996; Gallegos *et al.*, 2001; Gogorcena *et al.*, 2001). En otros casos se han propuesto tests de diagnóstico rápido con procedimientos colorimétricos de fácil utilización, como el uso del contenido relativo de clorofila (SPAD) (Kantety *et al.* 1996) o cartas de color.

El diagnóstico basado solamente en la presencia de síntomas visuales presenta varios inconvenientes. En algunos casos la sensibilidad es insuficiente, o es difícil de atribuir los síntomas a un desorden nutritivo concreto, y, en otros casos, cuando se presentan los síntomas, la planta ya ha sufrido reducción del crecimiento

y la corrección del problema es más difícil. El análisis de tejidos es, en general, una técnica más precisa y puede detectar problemas incipientes, aunque, por supuesto, es más costosa (Donald, 1991; Lambert, 1984). La mejor referencia para comparar los resultados son los valores críticos, que se establecen como aquellas concentraciones por debajo de las cuales ya se produce una reducción del crecimiento (Ingestad, 1979; Smith, 1986; Sinclair *et al.*, 1997). Estos valores críticos no están disponibles para todas las especies, por lo que en su defecto pueden utilizarse los de otras especies afines, o valores estándar de la especie en cuestión. Estos últimos valores se corresponden a los de plantas que han crecido presumiblemente con buenas condiciones nutritivas.

El objetivo del presente trabajo es estudiar, mediante cultivo hidropónico, el efecto de las deficiencias de N, P, K y Fe en el crecimiento, los síntomas visuales y la concentración foliar de nutrientes en dos especies de frondosas mediterráneas (*Quercus suber* L. y *Ceratonia siliqua* L.).

Material y métodos

Las especies estudiadas han sido *Quercus suber* L. (procedencia de Sierra Norte de Sevilla) y *Ceratonia siliqua* L. (procedencia de Montes de Málaga). La siembra de alcornoque (*Quercus suber* L.) tuvo lugar durante el mes de enero de 1998, mientras que el algarrobo (*Ceratonia siliqua* L.) se sembró a principios de marzo del mismo año. Se utilizaron envases «BARDI M-30» de 305 cm³ con una mezcla de turba:perlita (4:1 en volumen). La germinación y cultivo de las plantas tuvo lugar en el invernadero de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes (E.T.S.I.A.M.) de Córdoba, donde se regó a saturación 3 veces por semana con agua, sin realizar ningún tipo de fertilización, hasta que las plantas alcanzaron un tamaño adecuado (*Q. suber*: 5,8 cm; *C. siliqua*: 2,4 cm) para trasplantarlas al cultivo hidropónico.

Una muestra de semillas de los mismos lotes utilizados para obtener las plantas se analizó para determinar la concentración y el contenido de nutrientes (Tabla 1). Cabe destacar que la concentración de N y Mg fue mucho mayor en algarrobo y la de Ca en alcornoque. Cuando se comparan los contenidos por semilla se observa que son mayores en alcornoque para todos los elementos analizados, debido en gran parte al mayor tamaño de las semillas de esta especie.

Tabla 1. Concentración (mg g⁻¹) y contenido (g por semilla) de macroelementos en las semillas de los lotes utilizados en los distintos tratamientos

	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Calcio	Magnesio
Alcornoque (<i>Quercus suber</i> L.)					
Concentración (mg g ⁻¹)	11,36	0,8	11,0	6,3	2,1
Contenido (mg/semilla)	33,22	2,35	32,34	18,52	6,17
Algarrobo (<i>Ceratonía siliqua</i> L.)					
Concentración (mg g ⁻¹)	23,8	1,3	8,1	1,4	7,9
Contenido (mg/semilla)	5,47	0,29	1,86	0,32	1,81

En el mes de abril se transplantaron las plantas a recipientes de plástico cilíndricos (10 cm de diámetro y 11,5 cm de altura aproximadamente), conteniendo 900 ml de la solución nutritiva correspondiente a cada tratamiento. Los recipientes se envolvieron con papel de aluminio para evitar la entrada de luz. Cada planta se sujetaba por el tallo mediante una cinta de espuma, en un pequeño agujero realizado en el centro de una tapa de corcho blanco. La solución nutritiva se mantenía aireada de forma continua mediante una varilla hueca de vidrio conectada a un sistema de aireación forzado por un pequeño compresor. Durante los ensayos las plantas crecieron en las condiciones del umbráculo de la E.T.S.I.A.M. con un 50% de sombra. En el ensayo con algarrobo, tras 135 días en umbráculo, las plantas se trasladaron a una cámara de crecimiento con condiciones controladas de temperatura de 24 °C durante el día y 22 °C por la noche, 14 horas de fotoperiodo, humedad relativa del 60-80 % y radiación de 250 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Los ensayos se mantuvieron en el cultivo hidropónico hasta que las plantas alcanzaron un tamaño análogo al obtenido en planta de vivero a una savia. En *Q. suber* el periodo fue de 139 días, llegándose en el tratamiento control a plantas con valores medios de altura de 53 cm y en *Ceratonía siliqua* el

periodo fue de 190 días, llegándose en el tratamiento control a plantas con valores medios de altura de 14,5 cm, equiparables a los obtenidos en viveros forestales al final del cultivo (Navarro *et al.*, 1998).

En los dos ensayos se estudiaron cinco tratamientos: control, sin N, sin P, sin K y sin Fe. Para cada tratamiento se usaron 5 plantas, por lo que el número de plantas por especie fue de 25. Para el tratamiento control se utilizó la solución nutritiva de Hoagland completa, y para el resto de tratamientos soluciones modificadas. La concentración de los macroelementos, en los diferentes tratamientos, se muestra en la Tabla 2.

Con el fin de evitar que una deficiencia intensa de N redujera el crecimiento e impidiera la observación de síntomas, se utilizó una solución con baja concentración de N en una primera fase de un mes y posteriormente se cambió a sin N.

La concentración de microelementos fue la siguiente (μM): 50 KCl; 25 BO_3H_3 ; 2 $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$; 2 $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$; 0,5 $\text{CuSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$; 0,37 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ y 20 Fe-EDDHA. Esta composición fue igual para todos los tratamientos, excepto en el sin Fe, al que no se añadió Fe-EDDHA.

Todas las soluciones nutritivas se prepararon con H_2O desionizada y su pH inicial se ajustó a 5,5 con

Tabla 2. Concentración de macroelementos de las soluciones nutritivas utilizadas en los distintos tratamientos (mM)

	Control	Sin Fe (fase 1)	Sin N (fase 2)	Sin N	Sin P	Sin K
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	5	5			5	6,79
KNO_3	5	5	2,5		5	
MgSO_4	2	2	2	2	2	2
$\text{K}(\text{PO}_4\text{H}_2)$	1	1	1	1		
CaCl_2			5	5		
KCl			2,5	5	1	
$\text{Ca}(\text{PO}_4\text{H}_2)_2$						0,5
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$						0,71

KOH 0,1N o con NaOH 0,1N (en la solución sin K). Las soluciones nutritivas se renovaron cada 30 días, rellenando entre cambios con agua desionizada.

Los atributos morfológicos medidos fueron: altura total (cm) desde el nudo de la primera hoja en alcornoque, y desde el nudo de cotiledones en algarrobo, número de hojas y peso seco de raíz (g) y parte aérea (g), separando tallo y hojas. Para la medición de la altura se utilizó una regla milimetrada, mientras que, para la obtención de la biomasa, se determinó el peso seco de las diferentes partes del vegetal (hojas, tallos y raíces), las cuales se depositaron en bolsas de papel y se secaron en una estufa de ventilación forzada (Selecta Digitronic) a 65°C durante 24 horas. Se utilizó una balanza analítica

(Mettler AJ 150) de 0,1 mg de precisión, tras estabilizar la humedad de las muestras en desecador.

La evaluación de la clorosis se ha realizado con un medidor de clorofila portátil (Minolta, SPAD 502, 1989). Los valores SPAD están relacionados con la concentración de clorofila, de manera que aumentan al aumentar la misma. Las determinaciones se realizaron en hojas apicales y en hojas basales. Para cada planta y en cada zona se tomaron 8 medidas y se calculó la media correspondiente.

Al final de los ensayos se realizaron análisis de K, Ca, Mg, P y Fe en hojas del tercio apical de la planta en el caso del alcornoque. En algarrobo, debido al poco crecimiento y a la defoliación de las plantas en algunos

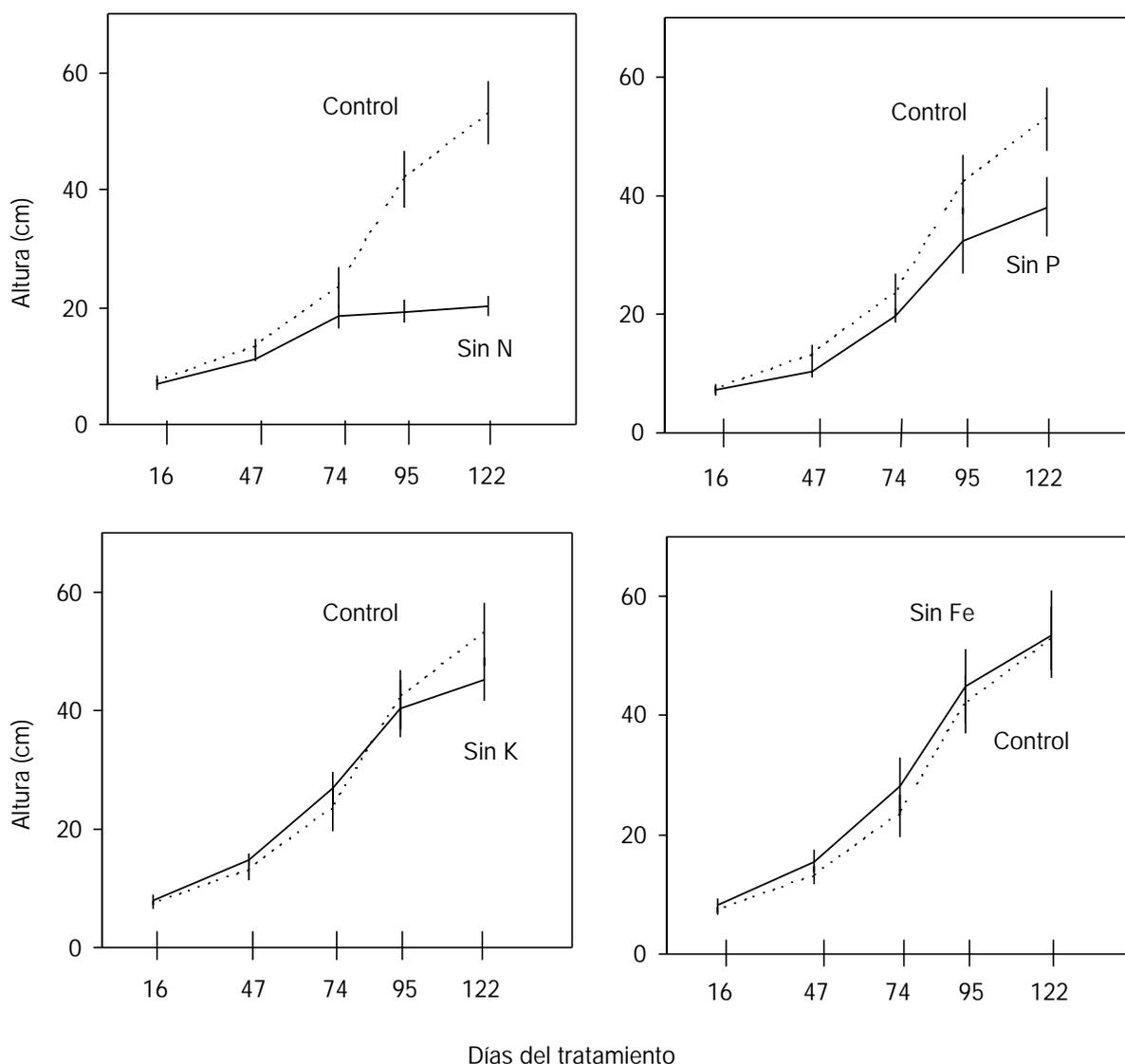


Figura 1. Curvas de crecimiento en altura (cm) de *Quercus suber* L. en cultivo hidropónico a lo largo del período de estudio.

de los tratamientos se decidió analizar el conjunto de todas las hojas para tener suficiente cantidad de muestra. La digestión de las hojas se realizó por vía húmeda en caliente con ácido nítrico y ácido perclórico concentrados. La concentración de K se midió por emisión y las de Ca, Mg y Fe por absorción atómica en un espectrofotómetro de llama Perkin-Elmer modelo 1100B. El P se determinó mediante un método colorimétrico con molibdato amónico (Murphy y Riley, 1962).

Los resultados se presentan como media y error estándar de las cinco plantas de cada tratamiento. La comparación entre tratamientos se realizó a partir de un análisis de la varianza; cuando las diferencias fueron significativas se realizó un test de comparación de me-

dias de Tukey, con un nivel de significación del 0,05 (Steel y Torrie, 1989). El programa estadístico utilizando para ello fue SPSS (Versión 8.0 1S, SPSS Inc.).

Resultados

Deficiencia de nitrógeno

Las plantas sometidas a deficiencia de N presentaron una notable reducción del crecimiento de la parte aérea en ambas especies. La evolución del crecimiento en altura (Figuras 1 y 2) muestra que prácticamente no hubo incremento a partir de los 74 días en

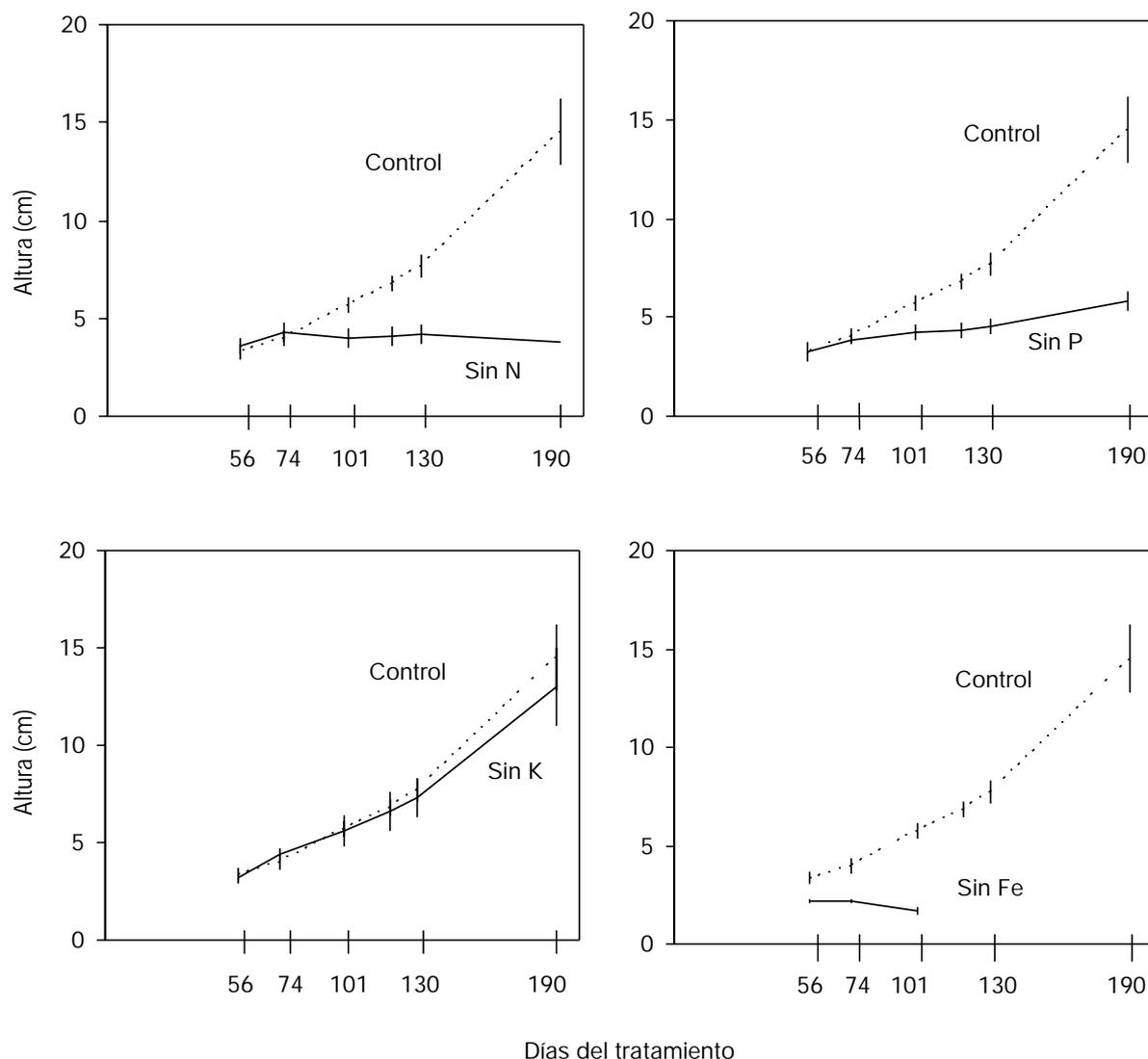


Figura 2. Curvas de crecimiento en altura (cm) de *Ceratonia siliqua* L. en cultivo hidropónico a lo largo del período de estudio.

Tabla 3. Atributos morfológicos obtenidos al final del período experimental para las dos especies estudiadas. Se presenta la media \pm desviación estándar (n=5). Las medias con alguna letra en común dentro de cada especie no son significativamente diferentes según el test de Tukey con un nivel de significación del 0,05

Tratamiento	Altura (cm)	⁽¹⁾ Peso seco de parte aérea (g)	⁽²⁾ Peso seco de raíz (g)	Relación ^{(1)/(2)}	Peso seco de 100 hojas (g)	N.º de hojas
<i>Quercus suber</i> L.						
Control	53,0 \pm 5,5 a	3,0 \pm 0,3 a	1,6 \pm 0,2 a	1,9 \pm 0,1 ab	5,6 \pm 0,6 a	34,2 \pm 3,7 a
Sin N	20,1 \pm 1,7 b	1,3 \pm 0,2 b	1,9 \pm 0,3 a	0,7 \pm 0,1 c	4,9 \pm 0,5 a	16,6 \pm 1,1 b
Sin P	38,1 \pm 4,9 ab	2,5 \pm 0,3 ab	1,8 \pm 0,1 a	1,4 \pm 0,1 bc	5,1 \pm 0,3 a	30,6 \pm 2,3 a
Sin K	45,3 \pm 3,5 a	3,6 \pm 0,4 a	1,6 \pm 0,2 a	2,3 \pm 0,3 a	5,9 \pm 1,1 a	35,0 \pm 1,8 a
Sin Fe	53,7 \pm 7,0 a	3,1 \pm 0,5 a	1,7 \pm 0,2 a	1,8 \pm 0,2 ab	6,0 \pm 0,6 a	30,6 \pm 2,7 a
<i>Ceratonia siliqua</i> L.						
Control	14,5 \pm 1,7 a	4,4 \pm 0,6 a	1,8 \pm 0,1 a	2,5 \pm 0,3 ab	22,3 \pm 2,3 ab	13,4 \pm 0,7 a
Sin N	3,8 \pm 0,4 b	1,3 \pm 0,2 b	0,7 \pm 0,1 b	2,3 \pm 0,4 ab	11,7 \pm 1,7 b	6,7 \pm 0,3 c
Sin P	5,8 \pm 0,5 b	0,8 \pm 0,1 b	0,6 \pm 0,1 b	1,5 \pm 0,2 b	13,4 \pm 2,4 ab	2,8 \pm 0,3 d
Sin K	13,3 \pm 1,7 a	3,4 \pm 0,2 a	1,1 \pm 0,2 ab	3,4 \pm 0,5 a	24,6 \pm 4,3 a	10,0 \pm 0,7 b

las plantas con deficiencias de N, mientras que las plantas control continuaron con una buena tasa de crecimiento. En la Tabla 3 se presentan los valores de va-

rios parámetros de crecimiento al final del ensayo. Las plantas con deficiencias de N tuvieron valores mucho más bajos que el control en altura, peso seco de la par-



Figura 3. *Quercus suber* L. en cultivo hidropónico a los 105 días de tratamiento. Planta control a la izquierda y sin N a la derecha.



Figura 4. *Ceratonia siliqua* L. en cultivo hidropónico a los 147 días de tratamiento. Planta control a la izquierda y sin N a la derecha.

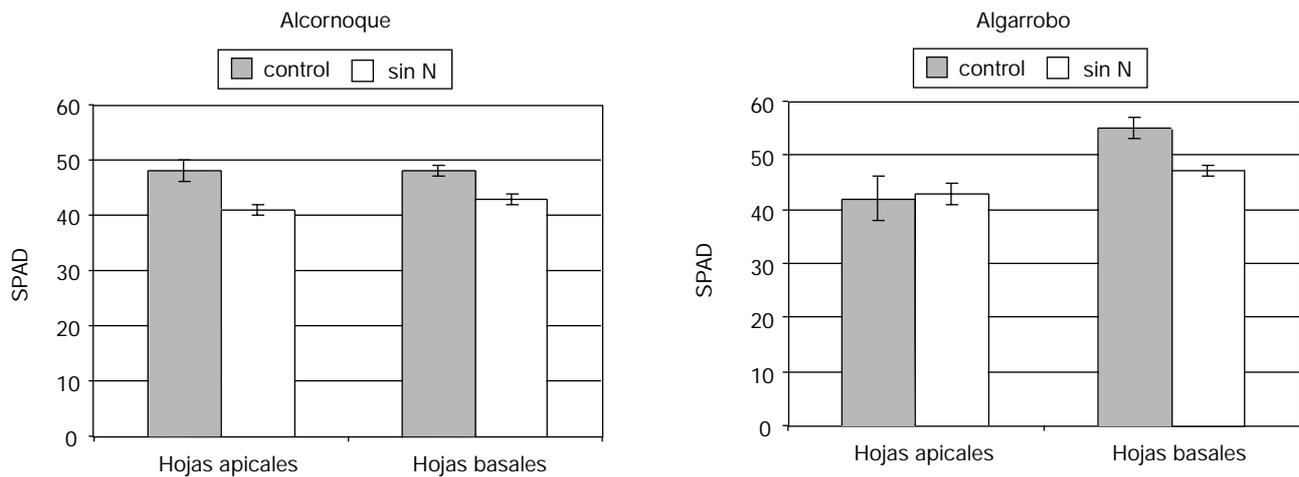


Figura 5. SPAD de las hojas apicales y basales de la planta en función del tratamiento y de la especie. Se representa la media \pm error estándar ($n = 5$).

te aérea y número de hojas. En algarrobo, el peso seco medio de las hojas también se vio reducido en el tratamiento sin N, mientras que en alcornoque no hubo diferencias significativas respecto al control. La deficiencia de N también afectó de forma distinta al crecimiento de la raíz en ambas especies, con fuerte reducción en algarrobo y sin efecto en alcornoque. Como consecuencia, la relación entre peso seco de parte aérea y raíz disminuyó en alcornoque y se mantuvo en algarrobo. En las figuras 3 y 4 puede apreciarse el aspecto de las plantas control y deficientes de N, en un momento próximo al final del experimento. Las plantas deficientes presentaron síntomas leves de clorosis, con valores de SPAD finales algo inferiores al control en hojas basales y apicales de alcornoque y en hojas basales de algarrobo (Figura 5).

En alcornoque, las hojas apicales de las plantas, deficientes en N tuvieron respecto a las del control, una concentración mucho mayor de P y en menor medida de Ca y Mg (Tabla 4).

Deficiencia de fósforo

La deficiencia de P afectó más al crecimiento del algarrobo que al del alcornoque. La evolución de la altura muestra una fuerte parada de crecimiento en algarrobo a partir de los 56 días de tratamiento, mientras que en alcornoque las diferencias respecto al control fueron menores (Figuras 1 y 2). Este efecto se confirma con las determinaciones de crecimiento realizadas al final del experimento, con una notable

Tabla 4. Concentración de macronutrientes obtenidos al final del período experimental para las dos especies estudiadas (mg g^{-1}). Se presenta la media \pm error estándar ($n = 5$)

Tratamiento	P	K	Ca	Mg	Fe
<i>Alcornoque</i>					
Control	1,8 \pm 0,1 bc	16,2 \pm 1,1 ab	2,7 \pm 0,2 b	1,1 \pm 0,2 b	125 \pm 15 a
Sin N	4,4 \pm 0,5 a	14,0 \pm 0,4 ab	3,9 \pm 0,5 ab	1,5 \pm 0,2 ab	88 \pm 15 a
Sin P	0,6 \pm 0,03 c	20 \pm 0,02 bc	2,3 \pm 0,3 b	1,6 \pm 0,1 ab	84 \pm 8 a
Sin K	2,0 \pm 0,4 b	6,0 \pm 0,4 c	6,6 \pm 0,7 a	2,7 \pm 0,1 a	106 \pm 6 a
Sin Fe	2,8 \pm 0,4 b	27,3 \pm 3,6 a	4,8 \pm 1 ab	2,3 \pm 0,4 a	87 \pm 6 a
Tratamiento	P	K	Ca	Mg	
<i>Algarrobo</i>					
Control	1,6 \pm 0,2 a	17,0 \pm 3,0 a	12,5 \pm 2,0 a	2,0 \pm 0,4 a	
Sin P	0,35 \pm 0,01 b	19,2 \pm 1,4 a	12,5 \pm 1,0 a	2,4 \pm 0,1 a	
Sin K	—	4,3 \pm 0,5 b	18 \pm 0,2 a	2,1 \pm 0,3 a	

reducción de la altura, pesos seco de la parte aérea y número y tamaño de las hojas en algarrobo, mientras que en el alcornoque las diferencias respecto al control fueron menores (Tabla 3). El crecimiento de la raíz también se vio muy afectado en algarrobo, mientras que en alcornoque fue similar al control; la relación entre el peso seco de parte aérea y el de raíz disminuyó en ambas especies respecto al control, siendo mayor la diferencia para algarrobo (Tabla 3).

En alcornoque no se apreciaron síntomas visuales, mientras que en algarrobo sí se desarrollaron en la segunda mitad del ensayo. Los primeros síntomas aparecen en hojas apicales, a partir de los 102 días, y consisten en grandes áreas de color verde claro y marrón. Posteriormente se extienden a hojas basales y ocurre una defoliación de hojas apicales seguidas de hojas basales.

El tratamiento con deficiencia de P provocó una reducción notable de la concentración de P en hojas de ambas especies, mientras que para el resto de elementos analizados las diferencias respecto de los controles fue pequeña (Tabla 4).

Deficiencia de potasio

Las plantas cultivadas sin aporte de K no presentaron, en general, diferencias significativas respecto al control en los diversos parámetros de crecimiento estudiados (Figuras 1 y 2, Tabla 3). No obstante, en algarrobo se produjo una pequeña disminución de los pesos secos de parte aérea y raíz y del número de hojas, que no ocurrió en alcornoque.

En las plantas deficientes aparecieron síntomas que fueron más acusados en algarrobo. En alcornoque, algunas de las plantas presentaron al final del ensayo una coloración rojiza en limbos, pecíolos y tallo de la zona apical. En algarrobo, a partir de 65 días ya se observaron síntomas en hojas basales, consistentes en manchas pardas con apariencia acartonada que se iniciaron en los bordes y posteriormente se extendieron hacia el centro, provocando su caída a partir de los 79 días.

La deficiencia de K resultó, en las dos especies, en una notable disminución de la concentración foliar de K respecto al control (Tabla 4). Además la concentración de Ca aumentó en las dos especies y la de Mg en alcornoque.

Deficiencia de hierro

Los efectos de la deficiencia de Fe fueron mucho más acusados en algarrobo que en alcornoque.

En alcornoque, las plantas cultivadas sin Fe presentaron un crecimiento similar al de las plantas control, como se observa en la evolución de las alturas de las plantas (Figura 1) y en los parámetros de crecimiento al final del experimento (Tabla 3). Sin embargo, las plantas deficientes mostraron síntomas de clorosis internervial en hojas apicales, llegando en alguna de las plantas a la aparición de puntos necróticos. La medición de los valores SPAD permitió cuantificar el grado de clorosis, siendo los valores en hojas apicales inferiores en las plantas deficientes a partir de los 104 días y mostrando una evolución ascendente a partir de ese momento (Figura 6). En las hojas basales los va-

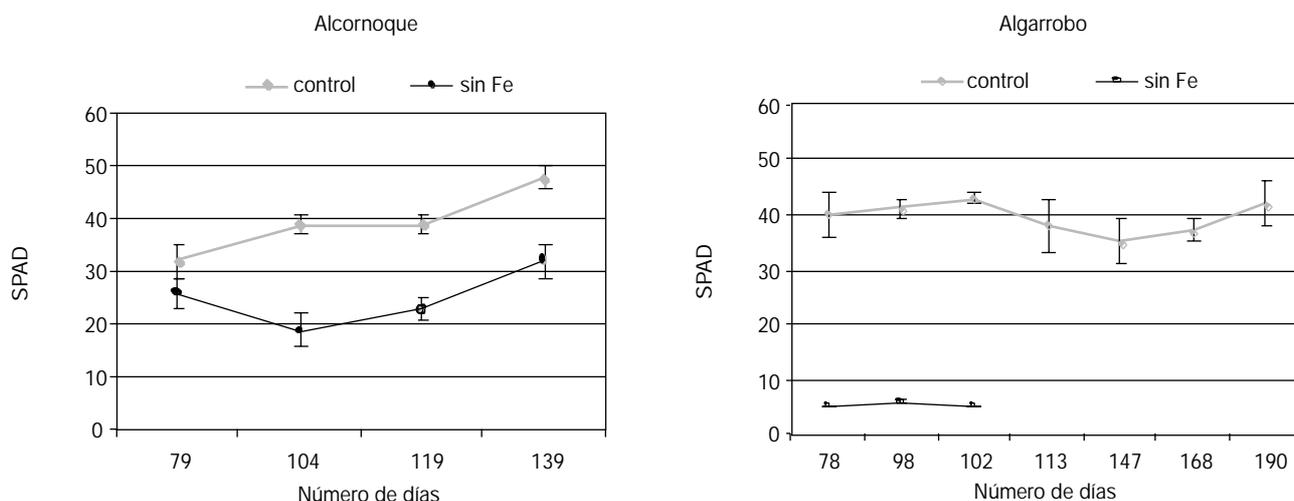


Figura 6. Evolución de los valores SPAD en el tratamiento control y sin Fe para alcornoque y algarrobo. Se representa la media \pm error estándar ($n = 5$).

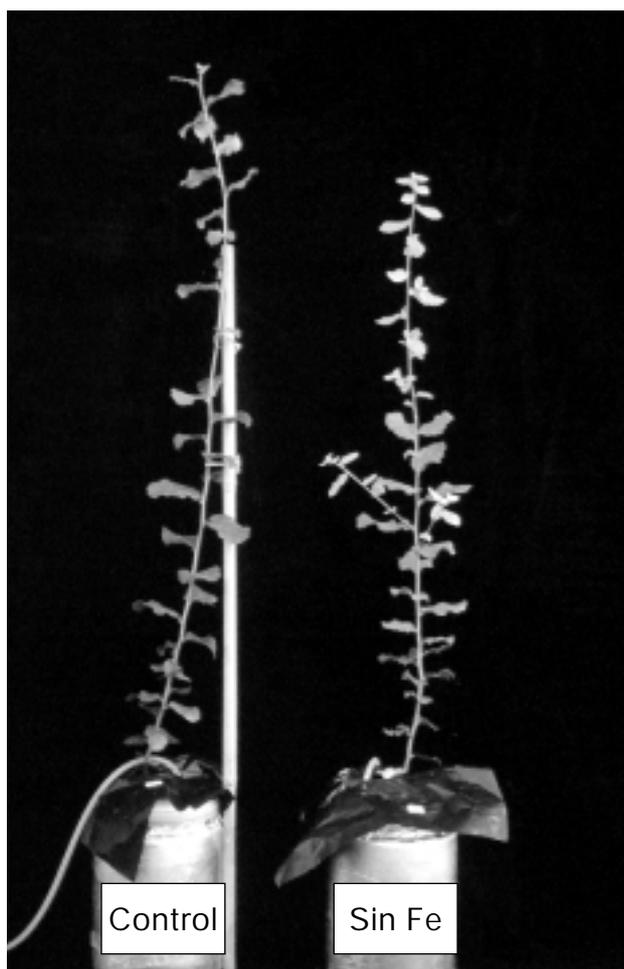


Figura 7. *Quercus suber* L. en cultivo hidropónico a los 105 días de tratamiento. Planta control a la izquierda y sin Fe a la derecha. Obsérvese la clorosis de la planta del tratamiento sin Fe.

lores fueron similares a los del tratamiento control, con valores medios comprendidos entre 43 y 49 (Figura 7). Los análisis foliares (Tabla 4) mostraron que en las plantas deficientes la concentración de Fe fue menor que en los controles, pero sin grandes diferencias. También cabe destacar un incremento de las concentraciones del resto de elementos analizados.

En algarrobo, el efecto de la deficiencia de Fe fue muy severo. A partir de los 56 días se detuvo el crecimiento en altura (Figura 2), mostrando las plantas síntomas muy acusados de clorosis y necrosis en hojas apicales, produciéndose defoliación y a los 100 días las plantas estaban prácticamente muertas. Como se observa en la Figura 6, los valores SPAD en hojas apicales eran muy bajos respecto al control a partir de los 78 días. Los síntomas de clorosis empezaron a manifestarse ya a los 33 días. En hojas basales los valores

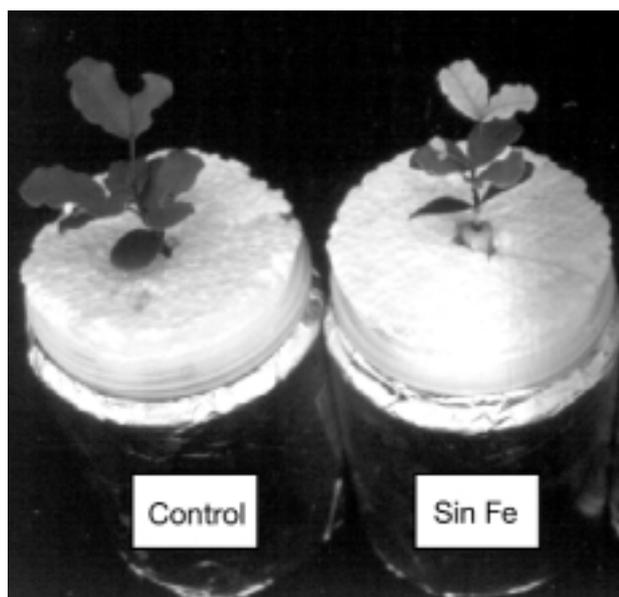


Figura 8. *Ceratonia siliqua* L. en cultivo hidropónico a los 59 días de tratamiento. Planta control a la izquierda y sin Fe a la derecha. Obsérvese la clorosis y el menor crecimiento de la planta sin Fe respecto a la planta control.

SPAD fueron también inferiores respecto al control, pero con diferencias mucho menores que en hojas apicales (SPAD medio a lo largo del cultivo: entre 45-50 en plantas deficientes y entre 50-60 en el control). La muerte de las plantas no permitió el análisis foliar (Figura 8).

Discusión

Las dos especies estudiadas mostraron una buena adaptación al cultivo hidropónico, como se desprende del buen crecimiento de las plantas en el tratamiento control. La magnitud de los efectos negativos de las deficiencias de N, P, K y Fe dependieron del tipo de nutriente y de la especie vegetal (Figura 1 y 2; Tabla 3). En general, el algarrobo se vio más afectado que el alcornoque, lo cual podría estar relacionado con una menor reserva de nutrientes en las semillas de algarrobo (Tabla 1). Además, podrían existir diferencias en eficiencia entre las dos especies, y aunque el diseño experimental no permite conclusiones en este sentido, los resultados obtenidos son indicativos de que, al menos para la deficiencia de Fe, el algarrobo es más sensible que el alcornoque. Independientemente de lo anterior, los resultados muestran que de cara al cultivo en vivero el control de los programas de fertiliza-

ción debe ser más cuidadoso en algarrobo que en alcornoque.

La deficiencia de N provocó una fuerte reducción del crecimiento en ambas especies, tanto en altura como en peso seco, afectando particularmente a la parte aérea, y con un menor efecto en el sistema radical, lo cual coincide con lo obtenido por otros autores (Bröwer, 1962; van den Driessche, 1992; Vaurina *et al.*, 1998). Sin embargo, el crecimiento de la raíz se vio mucho más afectado en el algarrobo, lo que supondría peor respuesta a una inadecuada fertilización con N y una peor calidad de planta. Sin embargo, esto puede estar condicionado por la reserva de nutrientes en las semillas, que también puede ser responsable de las diferencias entre especies (Tabla 1). Los síntomas de clorosis han sido similares a los descritos en la bibliografía (Marschner, 1986), pero con una intensidad muy baja. Una alternativa al estudio de deficiencias de N es el uso de SPAD, que ha sido sugerido como un buen estimador de la concentración de este nutriente, mediante la determinación indirecta de clorofila en hojas cuando está calibrado para la especie (Kantety *et al.*, 1996; Duru, 2002). En el presente trabajo, los valores SPAD en plantas deficientes fueron inferiores a los de las plantas control, pero con diferencias muy pequeñas (Figura 5). Es posible que en condiciones de deficiencias menos extremas el crecimiento no se viera tan frenado y aparecieran síntomas foliares de mayor intensidad. Esta situación sí permitiría evaluar la utilidad del SPAD para diagnosticar el grado de deficiencia de N.

El efecto de la deficiencia de fósforo en el crecimiento de las plantas no ha sido tan dramático como el N, pero en las especies estudiadas llega a producir pérdidas importantes de crecimiento de parte aérea, en particular en algarrobo, donde también afecta al crecimiento de la raíz (Tabla 3). El aumento de la relación de pesos de parte aérea y raíz, y la disminución del tamaño de las hojas observada en las plantas deficientes, especialmente en algarrobo, coincide con los efectos descritos para otras especies (Rao y Terry, 1989; Martins y Martins-Louçao, 1999). Sin embargo, los síntomas desarrollados en las plantas deficientes de algarrobo, clorosis y abscisión de hojas no coinciden con los descritos en la bibliografía (Marschner, 1986; Timmer, 1991), lo que sugiere que pudieran ser efectos indirectos ocasionados por la fuerte reducción del crecimiento radicular o por otras interacciones metabólicas. La demanda de P es menor a la de N y K (Marschner, 1986) y el algarrobo dispone de una reducida reserva en la semilla (Tabla 1). El escaso de-

sarrollo y la fragilidad del sistema radical del algarrobo lo puede hacer especialmente sensible a las deficiencias de P, debido a la conocida interacción de este nutriente en el desarrollo del sistema radical (Salisbury y Ross, 1992).

La deficiencia de K tuvo efectos menos acusados que la deficiencia de N o P. En alcornoque el crecimiento fue similar al control, mientras que en algarrobo hubo una cierta reducción del crecimiento en parte aérea y raíz (Tabla 3). Además, en algarrobo se produjeron síntomas en hojas basales de plantas deficientes, como se ha descrito para otras especies (Marcos y Marzo, 1971; Dell., 1996). La prolongación del periodo de tratamiento posiblemente habría acentuado los efectos sobre el crecimiento y el desarrollo de los síntomas.

Los síntomas visuales desarrollados por déficit de Fe, clorosis férrica y abscisión de hojas, han sido observados para otras especies forestales (Timmer, 1991; Landis, 1995). La deficiencia de Fe provocó efectos muy drásticos en algarrobo. Las plantas mostraron pronto síntomas típicos de clorosis en hojas apicales, que se fueron intensificando y finalmente se produjo la muerte prematura de plantas. En alcornoque el efecto fue ligero, no existiendo diferencias en crecimiento respecto al control (Tabla 3), y aunque también hubo síntomas de clorosis, fueron más leves que en algarrobo y disminuyeron al final del ensayo. La estimación de la clorosis mediante las medidas SPAD es un método ampliamente usado en los estudios de deficiencias de Fe en especies leñosas (Alcántara *et al.*, 2000), y que también ha dado resultados en el presente trabajo (Figura 6). La mayor tolerancia del alcornoque a la deficiencia de Fe puede relacionarse con el desarrollo de mecanismos fisiológicos de respuesta, puestos de manifiesto por Gorgocena *et al.* (2001).

El diagnóstico de desequilibrios nutritivos utiliza como herramienta el análisis foliar. Generalmente el análisis de elementos se realiza en hojas jóvenes expandidas (Harris *et al.*, 1977), por lo que en el presente trabajo se han utilizado este tipo de hojas en el caso del alcornoque, mientras que en el algarrobo se han analizado todas las hojas de la planta debido al escaso crecimiento y a la defoliación en algunos de los tratamientos. En los tratamientos con deficiencias de K y de P las concentraciones foliares respectivas fueron mucho menores que en los controles, para ambas especies (Tabla 4). Comparando estos valores con los de otros trabajos (Tabla 5) se observa que las concentraciones de K y P en los controles son más altas en el

Tabla 5. Concentraciones medias de macronutrientes en hoja de alcornoque y algarrobo (Navarro *et al.*, 1998; Cornelissen *et al.*, 1997; Planelles *et al.*, 2001)

Concentración de nutrientes (mg · g ⁻¹)	Alcornoque en cinco viveros de Andalucía (Navarro <i>et al.</i> , 1998)	Alcornoque (Cornelissen <i>et al.</i> , 1997)	Algarrobo en cinco viveros de Andalucía (Navarro <i>et al.</i> , 1998)	Algarrobo (Planelles <i>et al.</i> , 2001)
P	1,2±0,4	1,56	1,3±0,7	0,49-3,18
K	4,3±0,4	11,4	7,0±3,7	5,69-14,53
Ca	10,1±1,6	—	7,8±5,7	—
Mg	4,7±1,3	—	2,9±1,1	—

cultivo hidropónico, lo que podría explicarse por una mayor disponibilidad de estos nutrientes en el medio líquido. En los tratamientos deficientes, las concentraciones son en general inferior a las utilizadas de referencia, salvo para el K en alcornoque en Navarro *et al.* (1998). Por otra parte, las concentraciones de K y P en los tratamientos deficientes se aproximan bastante a los niveles críticos de deficiencia establecidos para otras especies leñosas (ver Fernández-Escobar, 1997), que se sitúan en torno a 0,5 mg g⁻¹ de P y a 4 mg g⁻¹ de K. La concentración de K en las plantas parece ser muy variable sin que afecte al crecimiento de la planta, lo cual puede explicarse por una retraslocación desde las hojas viejas, debido a la gran movilidad de este nutriente (Schachtmom *et al.*, 1998).

Las plantas de alcornoque cultivadas sin Fe tuvieron concentraciones de este elemento menores que las del control, pero las diferencias fueron pequeñas. Una posible explicación es que estas plantas, al sufrir deficiencia de Fe, indujeron mecanismos fisiológicos que permitieron una movilización del Fe acumulado en la semilla. Se ha demostrado que esta especie es capaz de inducir mecanismos de respuesta a la deficiencia en Fe (Gogorcena *et al.*, 2001). De hecho el valor SPAD de la planta sin Fe se aproximó al final al de las plantas control, indicando una recuperación de la clorosis (Figura 6).

Los análisis foliares también han puesto de manifiesto algunas interacciones, como el aumento de la concentración de P en plantas deficientes en N, el aumento de Ca y Mg en plantas deficientes de K o el aumento de K en plantas deficientes de Fe (Marschner, 1986; Mathers, 2000; Alcántara *et al.*, 2000).

La calidad final de planta en viveros forestales está condicionada por una buena fertilización, tanto respecto al crecimiento de las plantas, como puede verse en las especies objeto de estudio para las deficiencias de P y N, o por un inadecuado estado nutricional, por

ejemplo las debidas a las deficiencias de K. El cultivo hidropónico y los estudios de crecimiento y concentración de nutrientes en hoja han demostrado su utilidad para los estudios de deficiencias en especies forestales mediterráneas. Sin embargo, no todas las irregularidades en la morfogénesis de las hojas, pigmentación y senescencia están relacionadas claramente con la deficiencia de un elemento nutritivo. Se requiere una mejor descripción de síntomas, con un adecuado soporte gráfico que facilite el diagnóstico visual frente a otras alteraciones (Gallegos *et al.*, 2001), acompañado de un adecuado control alométrico del cultivo (Navarro *et al.*, 1998), lo que facilitaría el poder anticipar los efectos de muchas deficiencias.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo del INIA y la CICYT, a través de la convocatoria del Proyecto Estratégico Movilizador de I + D de apoyo a la forestación, mediante la financiación del proyecto FO96-006. Igualmente agradecemos a los evaluadores los comentarios y sugerencias realizados, lo que ha ayudado a mejorar la calidad del mismo.

Referencias bibliográficas

- ALCÁNTARA E., ROMERA F., CAÑETE M., DE LA GUARDIA M., 2000. Effects of bicarbonate and iron supply on Fe(III) reducing capacity of roots and leaf chlorosis of the susceptible peach rootstock «Nemaguard». *Journal of Plant Nutrition* 23 (11 y 12), 1607-1617.
- BOULD C., 1983. Methods of diagnosing nutrient disorders in plants. En: Bould C., Hewitt E., Needham P. (Ed.) 1983. *Diagnosis of Mineral Disorders in Plants. Volume I. Principles.* pp. 111-136. HUSO. London.
- BRÖWER R., 1962. Nutritive influences on the distribution of dry matter in the plant. *Neth. J. Agric. Sci.* 10, 399-408.

- CORNELISSEN J., WERGER M., CASTRO-DÍEZ P., VAN RHEENEN J., ROWLAND A., 1997. Foliar nutrient in relation to growth allocation and leaf traits in seedlings of a wide range of woody species and types. *Oecologia* 11, 460-469.
- DELL B., 1996. Diagnosis of nutrient deficiencies in eucalyptus. En: Attiwill, PM y Adams, MA (Ed). *Nutrition of Eucalyptus*. CSIRO. Australia. pp. 417-440.
- DONAL D., 1991. Nursery fertilization of conifer planting stock. En: van den Driessche, R. (Ed.) 1991. *Mineral nutrition in conifer seedlings*. CRC Press Florida. pp. 135-168.
- DURU M., 2002. Evaluation of chlorophyll meter to assess nitrogen status of cocksfoot sward. *Journal of Plant Nutrition*, 25 (2), 275-286.
- DURYEA M.L., 1985. Evaluating seedling quality: importance to reforestation. En: Duryea, M.L. (Ed.) *Evaluating seedling quality: principles, procedures, and predictive abilities of major tests*. Forest Research Laboratory. Oregon State University. Corvallis. pp. 1-4.
- FERNÁNDEZ-ESCOBAR R., 1997. Fertilización. En: Barranco, D.; Fernández-Escobar, R. y Rallo, L. (Eds.). *Olivicultura*. Mundi-Prensa Madrid. pp. 229-249.
- GALLEGOS PÉRULA V., NAVARRO CERRILLO R.M., ALCÁNTARA VARA E., 2001. Deficiencias nutritivas en las plantas de una savia de tres especies del Género *Pinus* sp. en cultivo hidropónico. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 10 (1), 43-58.
- GOGORCENA Y., MOLIAS N., LARBI A., ABADÍA J., ABADÍA A., 2001. Characterization of the response of cork oak (*Quercus suber*) to iron deficiency. *Tree Physiology* 21, 1335-1340.
- HARRIS R., PAUL J., AND LEISSER A., 1977. Fertilizing woody plants. University of California. *Agricultural Science Leaflet* 2958.
- INGESTAD T., 1979. Nitrogen stress in birch seedlings. *Physiol. Plant.* 45, 149-157.
- KANTETY R., VAN SANTEN E., WOODS F., WOOD C., 1996. Chlorophyll meter predicts nitrogen status of tall fescue. *J. Plant Nutr.* 19 (6), 881-889.
- LAMBERT M., 1984. The use of foliar analysis in fertilizers research. En: Grey D., Schönham A., Schutz C. (Ed.). *IUFRO Symposium on site and productivity of Forest Growing Plantations*. pp. 269-291.
- LANDIS T.D., 1989. Mineral Nutrients and Fertilization. En: Landis, T.D.; Tinus, R.W.; McDonald, S.E.; Barnett, J.P. *The Container Tree Nursery Manual*. Vol. 4. *Seedling Nutrition and Irrigation*. Forest Service. *Agriculture Handbook* 674. U.S. Department of Agriculture. pp. 1-70.
- LANDIS T.D., 1995. *Forestry Nursery Notes*. USDA. Oregon.
- MARCOS J., MARZO M.T., 1966. *Nutrición Hidropónica con Microelementos I. Manganese, boro y molibdeno en Pinus radiata*. Ministerio de Agricultura. I.F.I.E. Madrid.
- MARCOS J., MARZO M.T., 1968. *Nutrición Hidropónica con Macroelementos I. Nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio en Eucalyptus globulus*. Síntomas visuales de deficiencia y toxicidad. Ministerio de Agricultura. I.F.I.E. Madrid.
- MARCOS J., MARZO M.T., 1971. *Nutrición Hidropónica con macroelementos III. Nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio en Populus x euramericana «campeador»*. Síntomas visuales de deficiencia y toxicidad. Ministerio de Agricultura. I.F.I.E. Madrid.
- MARSCHNER H., 1986. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press.
- MARSCHNER H., KIRKBY E.A., CAKMAK I., 1996. Effect of mineral nutritional status on shoot-root partitioning of photoassimilates and cycling of mineral nutrients. *J. Exp. Bot.* 47, 1255-1263.
- MARTINS V., MARTINS-LOUÇAO M.A., 1999. Deficiencia de N, Mg, P o K en plantas de *Ceratonia siliqua* L.: respuestas ecofisiológicas. XIII Reunión de la Sociedad de Fisiología Vegetal. VI Congreso Hispano-Luso de Fisiología Vegetal. Sevilla.
- MATHERS H., 2000. Detection of mineral deficiencies in ornamentals. *GMPRO* 16 (5), 50-52.
- MINOLTA, 1989. *Chlorophyll meter SPAD-512 Operation Manual*, Minolta. Camera Co., Osaka, Japan.
- MURPHY J., RILEY, 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta* 27,31-36.
- NAVARRO R.M., DEL CAMPO A.D., ALEJANO R., ÁLVAREZ L., 1998. Caracterización de calidad final de planta de encina, alcornoque, algarrobo y acebuche, en cinco viveros de Andalucía. *Consejería de Agricultura y Pesca*. Junta de Andalucía.
- PLANELLES R., OLIET J., ARTERO F., LÓPEZ M., 2001. Efecto de las distintas dosis NPK sobre la calidad funcional de planta de *Ceratonia siliqua*. Respuesta en plantación. III Congreso Forestal Nacional. Tomo III, 599-605.
- PUTTONEN P., 1997. Looking for the «silver bullet». *Can one test do it all?* *New Forest* 13, 9-27.
- RAO I., TERRY N., 1989. Leaf phosphate status, photosynthesis, and carbon partitioning in sugar beet. *Plant Physiol.* 90, 814-819.
- SALISBURY F.N., ROSS C.N., 1992. *Plant Physiology*. Wardworth Publishing Company. Belmon.
- SCHACHTMOM D., REID J., AYLING S., 1998. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. *Plant Physiology* 116, 447-453.
- SINCLAIR A., HARRISON J., SMITH C., DODDS R., 1997. Determination of optimum nutrient elements ratios in plant tissue. *Journal of Plant Nutrition* 20 (9), 1069-1083.
- SMITH F., 1986. Interpretation of Plant Analysis: Concepts and Principles. En: Reuter D., Robinson (Ed.) 1986. *Plant Analysis: an interpretation normal*. pp. 1-12. Inkate Press. Melbourne.
- STEELL R., TORRIE J.R., 1989. *Bioestadística: principios y procedimientos*. 2.ª edición. McGraw Hill (Eds), México. 622 pp.
- TIMMER V.R., 1991. Interpretation of seedling analysis and visual symptoms. En: van den Driessche, R. (Ed.) 1991. *Mineral nutrition in conifer seedlings*. CRC Press. pp. 113-134.
- TIMMER V.R., 1997. Exponential nutrient loading: a new fertilization technique to improve seedlings performance on competitive sites. *New Forest* 13, 279-299.

- TIMMER V.R., ARMSTRONG G., MILLER B., 1991. Steady state nutrient preconditioning and early outplanting performance of containerised black spruce seedlings. *Canadian Journal of Forestry Research* 21, 585-594.
- VAN DEN DRIESSCHE R., 1991. Effects of nutrients on stocks performance forests. En: *Mineral nutrition of conifer seedling*. R van den Driessche (Ed). CRC Press. Boca Raton Ann Arbor Boston. pp. 229-260.
- VAN DEN DRIESSCHE R., 1992. Changes in drought resistance and root growth capacity of container seedlings in response to nursery drought, nitrogen and potassium treatments. *Canadian Journal of Forestry Research* 22 (5), 740-749.
- VAURINA C., HOCHMOTH G., OLSON S., 1998. Nitrogen fertilization of Florida grown tomato transplant: seasonal variation on greenhouse and field performance. *Hort. Sci.* 33, 251-254.