



UNIVERSIDAD DE MURCIA

ESCUELA INTERNACIONAL DE DOCTORADO

**Mejora en la producción y calidad de lechuga mediante
la optimización de las condiciones de cultivo en
sistemas hidropónicos bajo invernadero**

Juan Carmona Bayonas

2022



Mejora en la producción y calidad de lechuga mediante la optimización de las condiciones de cultivo en sistemas hidropónicos bajo invernadero.

Memoria presentada para aspirar al grado de Doctor por la Universidad de Murcia

Juan Carmona Bayonas

2022

Directores de la Tesis:

Vicente Martínez López

Profesor de Investigación CEBAS-CSIC

Francisco García Sánchez

Científico titular CEBAS-CSIC

Tutor Universidad de Murcia:

Vicente Martínez López

Profesor de Investigación CEBAS-CSIC

FINANCIACIÓN.

El autor de la presente Tesis Doctoral ha disfrutado de un contrato predoctoral otorgado por la Fundación Séneca (Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia) para la formación de personal investigador, dentro del Programa Regional de Talento Investigador y su Empleabilidad y Subprograma Regional de Contratos de Formación de Personal Investigador en Universidades y OPIS en la su Modalidad B: Ayudas para la formación de personal investigador en ámbitos de interés específico para la industria y con alta capacidad de transferencia de los resultados de la investigación generada, cofinanciado por Riegos y Tecnología, S.L. (RITEC, S.L.) y la Consejería de Empleo, Universidades y Empresa de la CARM Referencia 20339/FPI/17.

Esta tesis se ha realizado en el departamento de Nutrición Vegetal del CEBAS-CSIC con la colaboración de la empresa Riegos y Tecnología, S.L. (RITEC, S.L.).

Esta tesis se ha realizado en el marco del proyecto Nuevos Sistemas de Cultivo para la Producción de Hortalizas de Hoja -HIDROLEAF-, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y Fondos Europeos FEDER, dentro del Programa Estatal de I+D+i orientada a los Retos de la Sociedad, del. Referencia: RTC-2016-4827-2.

Ella le pidió que la llevara al fin de mundo
Él puso a su nombre todas las olas del mar
Se miraron un segundo
Como dos desconocidos

Joaquín Sabina

La novedad, dice, radica en el sistema de irrigación. Bajo el suelo del tempranal hay una cisterna cubierta por una rejilla metálica. Encima, dos palmos de tierra abonada y una capa de arena. Así se evita la evaporación, intensísima en aquella zona. A través de la rejilla metálica la planta hunde sus raíces en el agua.

Juan Goytisolo
Campos de Níjar, 1960

AGRADECIMIENTOS.

Me gustaría agradecer enormemente a mis directores de Tesis del CEBAS-CSIC, Dr. Vicente Martínez López y Dr. Francisco García Sánchez, por la dirección y supervisión durante estos años. En especial al Dr. Vicente Martínez López, primero por darme la oportunidad de trabajar en su equipo y después por hacer posible presentar esta memoria.

A mis compañeros de trabajo, por los buenos ratos que pasamos en el CEBAS-CSIC.

A la Fundación Séneca por la ayuda económica otorgada.

A la empresa Riegos y Tecnología, S.L. (RITEC, S.L.), cuyo interés e inversión en I+D+i hacen posibles este tipo de investigaciones y su posterior aplicación en el sector agrícola. Gracias por su ayuda y apoyo.

A mis amigos, por los ratos de desconexión.

Y, sobre todo, gracias a mis padres, por su apoyo durante toda mi vida ante los retos que me he ido planteando y el cariño que siempre me han dado.

ÍNDICE GENERAL

LISTADO DE ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS.

ÍNDICE DE FIGURAS.

ÍNDICE DE TABLAS.

ÍNDICE DE IMÁGENES.

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.

CAPÍTULO 1:

1. Introducción.....	3
1.1. La lechuga	4
1.1.1. Taxonomía y descripción botánica.....	4
1.1.2. Origen y domesticación.....	8
1.1.3. Producción y superficie cultivada	11
1.1.4. Composición y valor nutricional	13
1.2. El cultivo hidropónico	15
1.2.1. Definición.....	15
1.2.2. Sistemas de cultivo hidropónico.....	16
1.2.3. Ventajas y desventajas del cultivo hidropónico	20
1.2.4. La solución nutritiva en cultivos hidropónicos: composición y manejo	22
1.2.5. Casos de estudio del cultivo hidropónico de lechuga.....	25
1.3. Referencias bibliográficas.....	28

CAPÍTULO 2:

2. Justificación y objetivos	37
---	-----------

CAPÍTULO 3:

3. Experimento 1. Optimización del manejo de la solución nutritiva para el cultivo de lechuga Lollo rosso en un sistema flotante.....	41
3.1. Introducción.....	41
3.2. Material y métodos.....	41
3.2.1. Material vegetal.....	41
3.2.2. Descripción de las instalaciones.....	41
3.2.3. Software para el manejo del cultivo	47

3.2.4.	Operaciones de cultivo.....	47
3.2.5.	Diseño experimental.....	51
3.2.6.	Determinaciones.....	53
3.2.7.	Tratamiento estadístico de datos	57
3.3.	Resultados	58
3.3.1.	Parámetros de producción	58
3.3.2.	Estado nutricional del cultivo.....	61
3.3.3.	Parámetros de calidad.....	68
3.4.	Discusión	70
3.5.	Conclusiones	73
3.6.	Referencias bibliográficas.....	74

CAPÍTULO 4:

4.	Experimento 2. Comparación de dos sistemas de riego (sistemas flotante y flujo-reflujo) y optimización de su manejo en un cultivo hidropónico de lechuga Batavia.....	79
4.1.	Introducción.....	79
4.2.	Material y métodos.....	80
4.2.1.	Material vegetal.....	80
4.2.2.	Descripción de las instalaciones.....	80
4.2.3.	Software para el manejo del cultivo	81
4.2.4.	Operaciones de cultivo	81
4.2.5.	Diseño experimental.....	82
4.2.6.	Determinaciones.....	84
4.2.7.	Tratamiento estadístico de datos	89
4.3.	Resultados	89
4.3.1.	Oxígeno disuelto y temperatura en la SN en mesas	89
4.3.2.	Parámetros productivos	92
4.3.3.	Estado nutricional del cultivo.....	96
4.3.4.	Parámetros de intercambio gaseoso (fotosíntesis).....	107
4.3.5.	Parámetros de calidad.....	108
4.3.6.	Análisis bioquímicos	110
4.4.	Discusión	112
4.5.	Conclusiones	117
4.6.	Referencias bibliográficas.....	118

CAPÍTULO 5:

5. Experimento 3. Optimización de la densidad de plantación para el cultivo hidropónico vertical de ciclo cerrado de lechuga Butterhead.....	123
5.1. Introducción.....	123
5.2. Material y métodos.....	123
5.2.1. Material vegetal.....	123
5.2.2. Descripción de las instalaciones.....	124
5.2.3. Software para el manejo del cultivo	127
5.2.4. Operaciones de cultivo	127
5.2.5. Diseño experimental.....	127
5.2.6. Determinaciones.....	130
5.2.7. Tratamiento estadístico de datos	133
5.3. Resultados	133
5.3.1. Radiación incidente acumulada.....	133
5.3.2. Parámetros productivos	134
5.3.3. Estado nutricional de la parte aérea del cultivo.....	137
5.3.4. Parámetros de calidad.....	143
5.3.5. Eficiencia en el uso de la luz.	145
5.3.6. Relación entre parámetros productivos y radiación incidente.....	146
5.4. Discusión	147
5.5. Conclusiones.	151
5.6. Referencias bibliográficas.....	152

CAPÍTULO 6:

6. Conclusiones	155
------------------------------	------------

LISTADO DE ABREVIATURAS, SIGLAS Y ACRÓNIMOS:

A:	Altura de cultivo
a*:	Cromaticidad a
B:	Boro
b*:	Cromaticidad b
C:	Saturación
Ca(NO₃)₂:	Nitrato cálcico
CE:	Conductividad eléctrica
CEBAS:	Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura
CGN:	Centro de Recursos Genéticos de Holanda (Centre for Genetic Resources, the Netherlands)
cm:	Centímetro
Co.:	Empresa (Company)
CREM:	Centro Regional de Estadística de Murcia
CSIC:	Consejo Superior de Investigaciones Científicas
Cu:	Cobre
CuSO₄:	Sulfato de cobre
CV:	Caballo de vapor
cv.:	Cultivar
D:	Densidad de plantación (plantas/m ²)
D17:	Densidad de plantación de 17 plantas/m ²
D23:	Densidad de plantación de 23 plantas/m ²
D32:	Densidad de plantación de 32 plantas/m ²
DDG:	Días después de la germinación
DDT:	Días después del trasplante
DDTr:	Días después del tratamiento
Dis.:	Disolución
dS:	Decisiemen
EEUU:	Estados Unidos
ES:	Error estándar
EVA:	Etilvinilacetato
FAO:	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (Food and Agriculture Organization)
FAOSTAT:	Datos sobre alimentación y agricultura de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
Fe:	Hierro
Fe-EDTA:	Hierro quelatado

Fig.:	Figura
FR:	Sistema flujo-reflujo
GmbH:	Sociedad de responsabilidad limitada (Gesellschaft mit beschränkter Haftung)
h:	Hora
H:	Solución nutritiva Hoagland
H₂O:	Agua
H₂O₂:	Peróxido de hidrógeno
H₂PO₄⁻:	Ácido fosfórico
H₃BO₃:	Ácido bórico
ha:	Hectárea
HNO₃:	Ácido nítrico
K⁺:	Potasio
kg:	Kilogramo
KH₂PO₄:	Fosfato monopotásico
KNO₃:	Nitrato potásico
kw:	Kilowatio
L:	Luminosidad
LED:	Diodo emisor de luz (Light Emitting Diode)
LUE:	Eficiencia en el uso de la luz
Lux:	lumen/m ²
m:	Metro lineal
M:	Molar
m²:	Metro cuadrado
m³:	Metro cúbico
MAPA:	Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Gobierno de España
mf:	Materia fresca
mg:	Miligramo
Mg:	Magnesio
MgSO₄:	Sulfato de magnesio
min:	Minuto
MJ:	Megajulio
ml:	Mililitro
mM:	Minimolar
mm:	Milímetro
mmol:	Milomol
Mn:	Manganeso

MnSO₄:	Sulfato de manganeso
Mo:	Molibdeno
ms:	Materia seca
msnm:	Metros sobre el nivel del mar
n:	Tamaño de la muestra
N:	Nitrógeno
NaOH:	Hidróxido de sodio
NFT:	Técnica de la película de nutrientes (Nutrient Film Technique)
NGS:	Nuevo sistema de cultivo (New Grow System ®)
NH₄⁺:	Amonio
nm:	Nanómetro
NO₃⁻:	Nitrato
ns:	No significativo
O₂:	Oxígeno
P:	Fósforo
PA:	Parte aérea
PAR:	Radiación fotosintéticamente activa (Photosynthetically Active Radiation)
PC:	Polycarbonato
PE:	Polietileno
PF:	Peso fresco
PM:	Peso molecular
ppm:	Partes por millón
PS:	Peso seco
PVC:	Policloruro de vinilo
R:	Raíz
Rad:	Radiación
RadT₁:	Integral de radiación incidente en periodo preexperimental
RadT₂:	Integral de radiación incidente en periodo experimental
rpm:	Revoluciones por minuto
s:	segundo
S:	Azufre
SE:	Error estándar (Standard error)
SF:	Sistema flotante
SMS:	Servicio de mensajes cortos (Short Message Service)
SN:	Solución nutritiva
SPAD:	Soil Plant Analysis Development

T^a:	Temperatura
tm:	Tonelada
UE:	Unión Europea
USDA:	Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (U.S. Department of Agriculture)
UV:	Ultra violeta
v:	Coeficiente de reducción de la luz dependiente de la posición de cada unidad experimental en el invernadero
var.:	Variedad
Zn:	Zinc
ZnSO₄:	Sulfato de cinc
τ:	Coeficiente de extinción de luz en el invernadero.
Σrad:	Integral de radiación incidente por unidad experimental (Kw/m ² por planta).
°C:	Grado centígrado
µg:	Microgramo
µl:	Microlitro
µM:	Micromolar
µm:	Micrómetro

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1.1. Evolución mundial de la producción (miles de tm) de lechuga en el periodo 1961-2019 (FAOSTAT, 2021).	11
Figura 1.2. Evolución de la producción (miles de tm) de lechuga en la Región de Murcia en el periodo 2010-2020 (CREM, 2021).....	13
Figura 3.1. Esquema del cabezal de riego utilizado.	44
Figura 3.2. Diseño experimental.	51
Figura 3.3. Peso fresco de la parte aérea (PA) y rendimientos para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en la cosecha inicial y final. (A) Peso fresco de PA (g/planta) en cosecha inicial. (B) Peso fresco de PA (g/planta) en cosecha final. (C) Rendimiento (g/m ²) en cosecha inicial y (D) Rendimiento (g/m ²) en cosecha final. Los datos representan las medias $\pm$ SE con n=10. * y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.	58
Figura 3.4. Evolución del peso fresco (g/planta) de (A) la parte aérea, PA, y (B) de la raíz durante el cultivo de lechuga para los tratamientos “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H”. Los pesos fueron recogidos en los DDT 0, 8, 16, 27 y 34. Cada valor es la media de 10 lechugas.	61
Figura 3.5. Concentración de aniones en hoja (mg/100mg PS) para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en cosecha inicial y final: (A) nitratos y (B) cloruros. Los datos representan las medias $\pm$ SE con n=6. ns indica no significancia, mientras que * y *** indican diferentes grados de significancia con $P \geq 0.1$, $0.1 > P \geq 0.01$, $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.	62
Figura 3.6. Concentración de cationes macronutrientes en hoja (mg/100mg PS) para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en cosecha inicial y final: (A) potasio, (B) calcio, (C) fósforo, (D) azufre, (E) magnesio y (F) sodio. Los datos representan las medias $\pm$ SE con n=6. ns indica no significancia, mientras que * y *** indican diferentes grados de significancia con $P \geq 0.1$, $0.1 > P \geq 0.01$, $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.	63
Figura 3.7. Concentración de micronutrientes en hoja (mg/kg PS) para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en cosecha inicial y final: (A) boro, (B) cobre, (C) manganeso, (D) molibdeno, (E) hierro y (F) zinc. Los datos representan las medias $\pm$ SE con n=6. ns indica no significancia, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $P \geq 0.1$, $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$, $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.	64
Figura 3.8. Concentración de aniones en la raíz (mg/100mg PS) para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en cosecha inicial y final: (A) nitratos y (B) cloruros. Los datos representan las medias $\pm$ SE con n=6. ns indica no significancia, mientras que * y *** indican diferentes grados de significancia con $P \geq 0.1$, $0.1 > P \geq 0.01$, $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.	65
Figura 3.9. Concentración de macronutrientes en la raíz (mg/100mg PS) para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en cosecha inicial y final: (A) potasio, (B) calcio, (C) fósforo, (D) azufre, (E) magnesio y (F) sodio. Los datos representan las medias $\pm$ SE con n=6. ns indica no significancia, mientras que * y ** indican diferentes grados de significancia con	

- $P \geq 0.1$, $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 66
- Figura 3.10. Concentración de micronutrientes en la raíz (mg/kg PS) para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en cosecha inicial y final: (A) boro, (B) cobre, (C) manganeso, (D) molibdeno, (E) hierro y (F) zinc. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=6$. ns indica no significancia, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $P \geq 0.1$, $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$, $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 67
- Figura 3.11. Concentración de Carotenoides (Izquierda) y Clorofilas (Derecha) en hoja (mg/kg PF) para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en cosecha final: (A) clorofila a, (B) clorofilas b y (C) clorofila total. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que * indica significancia para $0.1 > P \geq 0.01$. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 69
- Figura 4.1. Diseño experimental del ensayo: flujo-reflujo (mesas 1, 2 y 3) 83
- Figura 4.2. Concentración de oxígeno disuelto (mg/l) en la SN de mesas de cultivo (nivel radicular: (A) Situación más favorable en SF para SF01, SF05 y SF10; (B) Situación más desfavorable en SF para SF01, SF05 y SF10; (C) Situación de mesa totalmente inundada en FR para FR15, FR20 y FR25. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=4$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ en cada uno de los días de muestreo, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 91
- Figura 4.3. Peso fresco (A) de la parte aérea y rendimientos (B) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en la cosecha final. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. * indica significancia con $0.1 > P \geq 0.01$. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a y b para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.. 93
- Figura 4.4. Área foliar específica (cm²/g PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en cosecha final. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que ** indica diferencia significativa con $0.01 > P \geq 0.001$. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 95
- Figura 4.5. Evolución del peso fresco (g/planta) de la parte aérea y de la raíz para (A y C) FR (FR15, FR20 y FR25) y (B y D) SF (SF01, SF05 y SF10). Las medidas fueron tomadas en los DDT 0, 10, 17 y 23. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$ 96
- Figura 4.6. Concentración de nitratos y nitrógeno total en hoja (mg/100mg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A y C) y cosecha final (B y D). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que * indica significancia con $0.1 > P \geq 0.01$. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a y b para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 97
- Figura 4.7. Concentración de cationes K, Ca y P en hoja (mg/100mg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A, C y E) y cosecha final (B, D y F). Los

datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que * y ** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$ y $0.01 > P \geq 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a y b para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.. 99

Figura 4.8. Concentración de cationes S y Mg en hoja (mg/100mg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A y C) y cosecha final (B y D). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a, b, c para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica el manejo que obtuvo mayor valor de los seis estudiados para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 100

Figura 4.9. Concentración de micronutrientes B, Cu y Mn hoja (mg/kg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A, C y E) y cosecha final (B, D y F). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a, b, c para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 100

Figura 4.10. Concentración de micronutrientes Mo, Fe y Zn en hoja (mg/kg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A, C y E) y cosecha final (B, D y F). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a y b para flujo-reflujo; x, y, z para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 101

Figura 4.11. Concentración de nitratos y nitrógeno total en raíz (mg/100mg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A y C) y cosecha final (B y D). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que * y ** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$ y $0.01 > P \geq 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a y b para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 102

Figura 4.12. Concentración de cationes K, Ca y P en raíz (mg/100mg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A, C y E) y cosecha final (B, D y F). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a, b, c para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 103

Figura 4.13. Concentración de cationes S y Mg en raíz (mg/100mg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A y C) y cosecha final (B y D). Los datos

representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que * y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a y b para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 104

Figura 4.14. Concentración de micronutrientes B, Cu y Mn raíz (mg/kg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A, C y E) y cosecha final (B, D y F). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a, b, c para flujo-reflujo; x, y, z para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 105

Figura 4.15. Concentración de micronutrientes Mo, Fe y Zn hoja (mg/kg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A, C y E) y cosecha final (B, D y F). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a, b, c para flujo-reflujo; x, y, z para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 106

Figura 4.16. Parámetros de intercambio gaseoso en la cosecha final: (A) fotosíntesis neta ($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}\cdot\text{s}$), (B) índice transpiración ($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}\cdot\text{s}$), (C) conductancia estomática ($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}\cdot\text{s}$), (D) concentración de CO_2 subestomático ($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}\cdot\text{s}$) y (E) eficiencia del uso del agua ($\text{mmol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$) medidos. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a, b, c para flujo-reflujo; x, y, z para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron o mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 108

Figura 4.17. Textura en hoja (Fuerza - N) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en la cosecha final: (A) textura hoja interna, (B) textura hoja externa y (C) textura total. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$ (textura total), $n=5$ (textura interna y externa). ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (x e y para sistema flotante) y γ indica el manejo que obtuvo mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 109

Figura 4.18. Concentración de clorofilas (uds. SPAD) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en la cosecha final. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. * indica significancia con $0.1 > P \geq 0.01$. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a y b para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 110

Figura 4.19. (A) peroxidación lipídica ($\mu\text{mol MDA/g PF}$) y (B) acumulación de peróxido de hidrógeno ($\mu\text{mol H}_2\text{O}_2/\text{g PF}$) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en la cosecha

final. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *** indica significancia con $P < 0.001$. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a y b para flujo-reflujo) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

.....	111
Figura 4.20. Capacidad antioxidante mediante DPPH (% RSA) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en la cosecha final. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *** indica significancia con $P < 0.001$. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (x, y, z para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.	111
Figura 5.1. Vista perfil y lateral de panel de cultivo vertical.	125
Figura 5.2. Croquis de vista lateral de panel de cultivo vertical.	125
Figura 5.3. Vista en planta de los tratamientos (densidades)	128
Figura 5.4. Radiación incidente acumulada (MJ/m^2) para D17, D23 y D32: según densidad de plantación (A) e interacción densidad de plantación y altura de cultivo (B). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=4$. *** indican significancia con $P < 0.001$. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.	134
Figura 5.5. Peso fresco de parte aérea (g/planta) para D17, D23 y D32 según densidad de plantación (A) e interacción densidad de plantación y altura de cultivo (B) y rendimiento productivo (kg/m^2) para D17, D23 y D32 según densidad de plantación (C). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=4$. ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.	135
Figura 5.6. Concentración de nitratos y cloruros en hoja ($\text{mg}/100\text{mg PS}$) para D17, D23 y D32: según densidad de plantación (A y C) e interacción densidad de plantación y altura de cultivo (B y D). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=4$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *** indica significancia con $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.	137
Figura 5.7. Concentración de potasio, calcio y fósforo en hoja ($\text{mg}/100\text{mg PS}$) para D17, D23 y D32: según densidad de plantación (A y B) e interacción densidad de plantación y altura de cultivo (C y D). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=4$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.	139
Figura 5.8. Concentración de azufre, magnesio y sodio ($\text{mg}/100\text{mg PS}$) para D17, D23 y D32: según densidad de plantación (A y B) e interacción densidad de plantación y altura de cultivo (C y D). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=4$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.	140
Figura 5.9. Concentración de boro, cobre y manganeso en hoja ($\text{mg}/100\text{mg PS}$) para D17, D23 y D32: según densidad de plantación (A y B) e interacción densidad de plantación y altura	

de cultivo (C y D). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=4$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que * y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 141

Figura 5.10. Concentración de molibdeno, hierro y zinc en hoja (mg/100mg PS) para D17, D23 y D32: según densidad de plantación (A y B) e interacción densidad de plantación y altura de cultivo (C y D). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=4$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 142

Figura 5.11. Contenido de clorofilas (uds. SPAD) en hoja para D17, D23 y D32: según densidad de plantación (A) e interacción densidad de plantación y altura de cultivo (B). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=4$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 145

Figura 5.12. Eficiencia en el uso de la luz -LUE- (g ms/MJm^2) para D17, D23 y D32: según densidad de plantación (A) e interacción densidad de plantación y altura de cultivo (B). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=4$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos. 146

Figura 5.13. Relación entre el peso fresco medio de los brotes (A) y el peso seco (B) con la radiación incidente acumulada para D17, D23 y D32: Los datos representan las medias con $n=4$ 146

ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 1.1. Encuadre taxonómico de <i>Lactuca sativa</i> L. (De Vries, 1997).....	4
Tabla 1.2. Producción (tm), superficie cultivada (ha) y rendimiento (tm/ha) de lechuga en los principales países productores en 2019 (FAOSTAT, 2021).....	11
Tabla 1.3. Producción (tm), superficie cultivada (ha) y rendimiento (tm/ha) de lechuga en España en el periodo 2010-2019 (MAPA, 2021).....	12
Tabla 1.4. Producción (tm) y superficie cultivada (ha) de lechuga por municipios de la Región de Murcia en 2020 (CREM, 2021).....	13
Tabla 1.5. Valor nutricional por tipos de lechuga por cada 100 g de porción comestible (USDA, 2021).....	14
Tabla 1.6. Nutrientes esenciales que debe contener toda solución nutritiva para un sistema de cultivo hidropónico.....	23
Tabla 1.7. Concentraciones de solución nutritiva propuesta por Hoagland y Arnon en 1938 y su modificación en 1950.	23
Tabla 3.1. Concentración de sales y macronutrientes utilizadas para la preparación de la SN...	49
Tabla 3.2. Concentración de sales y micronutrientes utilizadas para la preparación de la SN. ..	50
Tabla 3.3. Tratamientos propuestos.	51
Tabla 3.4. Longitud de tallo (cm/planta), contenido en materia seca de PA (g ms/planta), contenido relativo de agua de PA (%), peso fresco de R (g/raíz), materia seca de R (g ms/planta) y contenido relativo de agua de R (%) para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en cosecha inicial y final.....	60
Tabla 3.5. Parámetros que determinan el color en hoja: Luminosidad (esc. 0-100), Cromaticidad a y b (esc. 0-100), Saturación (esc. 0-100) y Ángulo Hue (grados). Contenido de antocianos (mg cianidina/Kg mf) y clorofila (uds. SPAD) en hoja para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en la cosecha final.....	68
Tabla 4.1. 4.1. Tiempo de recirculación por ciclo y tiempo entre ciclos de los distintos tratamientos del ensayo realizado en Batavia Verde bajo dos sistemas de cultivo hidropónico.....	82
Tabla 4.2. Temperatura (°C) de SN en las mesas de cultivo (nivel radicular): para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10. Fueron comparados los manejos dentro de cada sistema de riego en 0, 4, 7, 10, 15, 18 y 23 DDT.....	92
Tabla 4.3. Longitud de tallo (cm/planta), materia seca de PA (g ms/planta), y contenido relativo de agua de PA (%) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en la cosecha final...	94
Tabla 4.4. Peso fresco de R (g/raíz), materia seca de R (g ms/raíz) y contenido relativo de agua de R (%) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en la cosecha final.	95
Tabla 4.5. Parámetros que determinan el color en hoja: Luminosidad (esc. 0-100), Cromaticidad a y b (esc. 0-100), Saturación (esc. 0-100) y Ángulo Hue (grados) en hoja para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en la cosecha final.	109
Tabla 4.6. Niveles de concentración de déficit, normalidad y toxicidad de elementos minerales en hoja de lechuga según Kim y col. (2016) y USDA (2021).....	114
Tabla 4.7. Consumo diario recomendado y nivel máximo tolerable de minerales en la dieta según Martínez, E. y Lendoiro R.M. (2005).....	115
Tabla 5.1. Grupos de radiación (MJ/m ²) observados en el experimento.....	133

Tabla 5.2. Longitud de tallo (cm/planta), materia seca de PA (g ms/planta), y contenido relativo de agua de PA (%) para D17, D23 y D32: según densidad de plantación y altura de cultivo.	136
Tabla 5.3. Longitud de tallo (cm/planta), materia seca de PA (g ms/planta), y contenido relativo de agua de PA (%) para D17, D23 y D32: según densidad de plantación e interacción densidad de plantación y altura de cultivo.	136
Tabla 5.4. Distribución de la producción de lechuga por tamaño para D17, D23 y D32: según densidad de plantación (A), altura de cultivo (B) e interacción densidad de plantación y altura de cultivo (C, D y E).	143
Tabla 5.5. Parámetros que determinan el color en hoja: Luminosidad (esc. 0-100), Cromaticidad a y b (esc. 0-100), Saturación (esc. 0-100) y Ángulo Hue (grados) en hoja para D17, D23 y D32: según densidad de plantación y altura de cultivo.	144
Tabla 5.6. Parámetros que determinan el color en hoja: Luminosidad (esc. 0-100), Cromaticidad a y b (esc. 0-100), Saturación (esc. 0-100) y Ángulo Hue (grados) en hoja para D17, D23 y D32: según la interacción densidad de plantación y altura de cultivo.....	144

ÍNDICE DE IMÁGENES:

Imagen 1.1. Lechuga tipo Iceberg.....	6
Imagen 1.2. Lechuga tipo romana o cos.....	6
Imagen 1.3. Lechuga tipo rosso.	6
Imagen 1.4. Lechuga tipo de tallo o espárrago.....	7
Imagen 1.5. Lechuga tipo española o Trocadero.....	7
Imagen 1.6. Lechuga tipo Hoja de Roble.....	7
Imagen 1.7. Lechuga tipo Little Gem.	8
Imagen 1.8. Primeras ilustraciones conocidas de lechuga aparecidas en Europa. A y B: Gart der Gesundheit de Peter Schöffer (1485). C y D: Das Kräuterbuch de Fuchs (1543).....	10
Imagen 1.9. Cultivo hidropónico de lechuga a raíz desnuda en solución nutritiva.....	15
Imagen 1.10. Cultivo hidropónico vertical de fresa	19
Imagen 1.11. Diferentes cultivos verticales hidropónicos de lechuga a raíz desnuda en solución nutritiva: A) Invernadero de lechuga en azotea de edificio con estructuras verticales columnares en el norte de Italia, B) Cultivo vertical de lechuga en azotea de Barcelona (España), C) Cultivo vertical de lechuga en Singapur, D) Cultivo vertical de lechuga en Yakarta (Indonesia), E) y F) Cultivo vertical de lechuga en instalaciones del CEBAS-CSIC en Santomera (España).	19
Imagen 3.1. Cultivo hidropónico a raíz desnuda de lechuga Lollo rosso en mesas.	44
Imagen 3.2. Sistema Flotante. Dentro del círculo rojo se observa el rebosadero que permite mantener siempre ajustado el nivel de SN en la mesa de cultivo.....	46
Imagen 3.3. Germinación de semillas de Lollo rosso.	48
Imagen 3.4. Desarrollo de plántulas y crecimiento de	48
Imagen 3.5. Medición de parámetros de la SN de las	50
Imagen 3.6. Diseño experimental en invernadero.....	51
Imagen 3.7. Medición de peso fresco durante el muestreo.	53
Imagen 3.8. Medición de los parámetros de color en.....	56
Imagen 4.1. Detalle de raíz de lechugas tipo Batavia. Comparativa de dos lechugas, una con problemas en raíz por mala oxigenación y otra con raíz bien oxigenada (izquierda) y raíces con graves problemas en raíz por mala oxigenación (derecha).	79
Imagen 4.2. Sistema Flujo-Reflujo: mesa inundada de SN (izquierda) y mesa vacía tras drenaje de SN (derecha).	81
Imagen 4.3. Detalle de raíz de plántula a los 7 DDG (izquierda). Antes del trasplante definitivo se requiere un desarrollo de la raíz de hasta 8 cm de largo que se conseguirá en la operación de cultivo “desarrollo de plántulas y crecimiento de raíces” (derecha).....	81
Imagen 4.4. Disposición de las dos	83
Imagen 4.5. Medición de longitud de tallo y área foliar durante el experimento.....	86
Imagen 4.6. Preparación de muestra y medición de textura de hoja en TA. XT.plus Texture Analyser	87
Imagen 4.7. Medición de parámetros de intercambio gaseoso.....	89
Imagen 5.1. Vista de las estructuras verticales.....	124

Imagen 5.2. Oxigenación de SN en cuba mediante cascada del drenaje y recirculación.	126
Imagen 5.3. Trasplante definitivo a canales de cultivo de las estructuras verticales.	129

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES:

Ilustración 1.1. Historia de la domesticación y reproducción de la lechuga (Wei et al., 2021). ...	9
Ilustración 1.2. Esquema de sistema NFT (Sharma y col., 2018).	16
Ilustración 1.3. Esquema de sistema flotante (Sharma y col., 2018).....	17
Ilustración 1.4. Esquema de sistema flujo-reflujo (Sharma y col., 2018).	17
Ilustración 1.5. Esquema de sistema por goteo (drip system) (Sharma y col., 2018).	18
Ilustración 1.6. Esquema de sistema aeropónico (Sharma y col., 2018).....	18

Capítulo 1: Introducción

1. Introducción

La producción alimentaria es un componente transcendental para la vida y supervivencia de los seres humanos; siendo la agricultura, por tanto, un sector fundamental para el crecimiento y desarrollo de cualquier población (Tambakhe y Gulhane, 2020). Además de contribuir a la producción de alimentos, la agricultura soporta la mayor parte del crecimiento rural de los países en vías de desarrollo, suponiendo la única fuente de ingresos de alrededor del 70% de esta población (FAO, 2006). Los medios de subsistencia de millones de personas en el planeta dependen de la agricultura, directa o indirectamente (FAO, 2006). Por otra parte, existe una mayor demanda de alimentos saludables y de calidad producidos mediante técnicas respetuosas con el medio ambiente (Jan y col., 2021), siendo el acceso a una alimentación sana, nutritiva y segura uno de los principales desafíos a los que se enfrenta la población mundial (Tambakhe y Gulhane, 2020).

Las predicciones demográficas mundiales advierten un aumento global en la demanda de alimentos (Godfray, 2018; Silva y Giller, 2021). Este aumento de la demanda no será homogéneo en todo el mundo, siendo zonas en desarrollo como el sudoeste asiático, India y África subsahariana las que mayores aumentos demográficos tendrán. Además, se prevé un aumento de población importante en áreas urbanas de todo el mundo. Se calcula que más de 5.000 millones de personas se ubicarán en zonas urbanas en 2030 (Avgoustaki y Xydis, 2020). Con estas premisas, un aumento de la producción agrícola será indispensable en el futuro. No obstante, este incremento de la producción agrícola mediante la puesta en cultivo de nuevas tierras no es una solución deseable debido a la pérdida de biodiversidad que conlleva (Zabel y col., 2019). A esta circunstancia, se unen los problemas que afectan actualmente a la agricultura: la disminución de la disponibilidad de tierra cultivable, la contaminación y uso indiscriminado de agua y fertilizantes, y la imprevisibilidad en los patrones meteorológicos derivado del cambio climático (Despommier, 2011; Jan y col., 2021). Ante este escenario, la agricultura se encuentra frente al reto de adoptar sistemas de cultivo más productivos y ecológicamente sostenibles. Una de las posibles opciones es el cultivo hidropónico de ciclo cerrado, que viene dando resultados prometedores en todo el mundo (Sardare, 2013). Este tipo de sistemas de cultivo supone un aumento de la productividad por unidad de superficie cultivada y evita que los fertilizantes y pesticidas lleguen a los ecosistemas naturales (Frasetya y col., 2021; Jan y col., 2021; Sardare, 2013; Sharma y col., 2018; Swain y col., 2021). Los sistemas hidropónicos alimentan hoy en día a millones de personas en zonas de África y Asia (Sardare, 2013), mejorando el estilo de vida y aumentando el crecimiento económico de estos países (Jan y col., 2021). Además, producen un alto rendimiento de los cultivos locales en las zonas superpobladas (Cifuentes-Torres y col., 2021; De Vries, 1997; Jan y col., 2021; Sukprasert, 2018). El siguiente paso en el desarrollo de las técnicas de cultivo hidropónico será su modernización tecnológica para cultivar todo tipo de

plantas y la mejora en el manejo de los cultivos. Por lo tanto, la hidroponía da un rayo de esperanza para la gestión de la producción de cultivos y alimentos (Jan y col., 2021). Esta tesis trata de la optimización del manejo de sistemas hidropónicos en el cultivo de la lechuga bajo invernadero con el objetivo de incrementar el rendimiento de este cultivo por superficie cultivada a la vez que se disminuyen los insumos relacionados con la fertilización y el riego.

1.1. La lechuga

1.1.1. Taxonomía y descripción botánica

La familia botánica *Asteraceae* (antes *Compositae*) es un grupo de plantas diverso con una distribución mundial que comprende entre 23.000 y 30.000 especies (Funk y col., 2005), entre las que se encuentran varias de interés agroalimentario como la alcachofa (*Cynara cardunculus*), la endivia (*Cichorium endivia*), el girasol (*Helianthus annuus*) o la lechuga (*Lactuca sativa* L.), además de aquellas con un valor ornamental como la dalia (*Dahlia spp.*), el crisantemo (*Chrysanthemum spp.*) o la caléndula (*Calendula spp.*). Dentro de la especie *Lactuca sativa* se incluyen aproximadamente a unos 100 tipos: 17 especies europeas, 10 especies norteamericanas, 33 especies tropicales de África oriental y unas 40 especies asiáticas (de Vries y van Raamsdonk, 1994). El encuadre taxonómico completo de *Lactuca sativa* L. es el siguiente (Tabla 1.1):

Tabla 1.1. Encuadre taxonómico de *Lactuca sativa* L. (De Vries, 1997).

Reino	Plantae
División	Angiospermae
Clase	Dicotyledoneae
Orden	Asterales
Familia	Asteraceae (Compositae)
Subfamilia	Cichorioideae
Tribu	Cichorieae (Lactuceae)
Género	Lactuca
Especie	<i>Lactuca sativa</i> L.

La lechuga es una planta anual y autógama que puede llegar a medir hasta un metro de altura. Su morfología es muy variable en función del tipo y variedad de lechuga que se trate. De forma general, las hojas se desarrollan en una roseta basal, desplegadas al principio de su ciclo vegetativo, y, luego, en función del tipo de lechuga, pueden formar cogollo o no. Existe una gran diversidad en cuanto a la forma de hoja: lanceoladas, oblongas, redondas; con borde ondulado, lobulado, liso o dentado. La superficie es plana, rugosa o abarquillada. También presenta una gran variedad en cuanto al color: amarillento, diferentes tonos de verde, rojizo o púrpura. Su consistencia varía desde las más rígidas y crujientes a las mantecosas. Posee una raíz pivotante que presenta ramificaciones y que no suele sobrepasar los 25 cm de profundidad. No obstante, la fisionomía radicular puede variar en función del sistema de producción (cultivo en suelo o cultivo hidropónico), del tipo de riego y de suelo (Maroto y Baixauli, 2016). Por otro lado, cuando se hace siembra directa se aprecia una raíz pivotante más profunda que cuando se recurre al

trasplante, donde esa raíz pivotante casi desaparece y se divide en otras laterales (Maroto y Baixauli, 2016). Con sistemas de riego localizado y en función del tipo de suelo y manejo se puede dar un sistema radicular más superficial (Maroto y Baixauli, 2016). El tallo es cilíndrico y ramificado, siendo en la mayoría de las variedades comerciales muy corto en el momento óptimo de cosecha. Al iniciarse la etapa reproductiva surge el tallo floral que se ramifica y del que surgen hojas e inflorescencias terminales, formadas por capítulos en racimos. Las flores, de color amarillo, tienen un diámetro de 1 a 1,5 cm. El fruto es un aquenio obovado y comprimido, de color blanco, amarillo, marrón o negro, que mide de 2 a 4 mm de longitud. En su base se dispone un vilano plumoso que facilita su dispersión por el viento.

Desde el punto de vista botánico, *Lactuca sativa* L. se divide en cuatro tipologías (Křístková y col., 2008):

- *L. sativa* var. *capitata* L. Engloba a todos aquellos cultivares que forman con sus hojas un cogollo más o menos compacto. La forma de sus hojas suele ser ancha y redondeada y su textura varía desde crujiente (tipo Iceberg) a mantecosa (tipo Butterhead).
- *L. sativa* var. *longifolia* Lam. Comprende los cultivares de lechuga romana o tipo cos. Sus hojas son alargadas y suele tener un porte erguido.
- *L. sativa* var. *intubacea* Hort. Incluye a todos los cultivares con hojas abiertas, aunque en estado avanzado de madurez pueden formar un pequeño cogollo interior.
- *L. sativa* var. *augustana* Irish. Se cultivan por su tallo (única parte aprovechable para consumo), siendo sus hojas lanceoladas. Se utiliza ampliamente como verdura gourmet y como medicina tradicional en China (Han y col., 2010).

Desde el punto de vista comercial, la gran diversidad morfológica que presenta la lechuga hace que se agrupen por tipos. Estos agrupamientos están basados en la forma, el tamaño y la textura de las hojas, la formación de la cabeza y el tipo de tallo. A pesar de las variaciones morfológicas, los diferentes tipos de lechuga comparten rasgos agronómicos comunes, como la morfología de la hoja entera y la ausencia de espinas a lo largo de la nervadura central de la hoja (De Vries, 1997). Algunos autores consideran seis grupos (Mou, 2008), aunque, de forma generalmente aceptada, la lechuga cultivada se agrupa en siete tipos diferentes (De Vries, 1997; Still, 2007; Wei y col., 2021):

- Lechuga tipo Iceberg (Crisphead en EEUU), en la que se incluyen las tipo Batavia. Está constituida por variedades de entre 700 y 1000 g de peso, que al desarrollarse forman un cogollo apretado y denso. Las hojas suelen ser anchas y de forma redondeada. Después del brote de las primeras 10-12 hojas, las nuevas hojas comienzan a superponerse entre sí y plegarse unas sobre otras para formar el cogollo (ver Imagen 1.1). La hoja es crujiente y con nervadura muy marcada. Es el tipo de lechuga más popular en EEUU.



Imagen 1.1. Lechuga tipo Iceberg.

- Lechuga tipo romana o cos (Imagen 1.2). Se caracteriza por poseer unas hojas oblongas, erguidas y rígidas, y un nervio central prominente con hojas de color verde oscuro (De Vries, 1997). No forman verdaderos cogollos. Tienen un sabor más dulce y fuerte que el de las lechugas acogolladas. Es el tipo de lechuga más común en Europa (Ryder, 1986), si bien desde hace años empiezan a destacar otros tipos.



Imagen 1.2. Lechuga tipo romana o cos.

- Lechuga tipo Lollo (Imagen 1.3). Grupo considerablemente diverso en cuanto al tamaño, la forma, color y textura. No forma cabezas firmes, sino que produce una masa densa de hojas en forma de roseta en el centro de la planta. La hoja puede variar de márgenes lisos a profundamente lobulados y puede incluir hojas rizadas o con flecos. Suelen presentarse lechugas de hoja verde u hoja roja, siendo este último muy apreciado en ensaladas y presentando diferentes tonos dependiendo del contenido de antocianina y de la intensidad de la luz durante el crecimiento.



Imagen 1.3. Lechuga tipo rosso.

- Lechuga de tallo o tipo espárrago (Imagen 1.4). Estas lechugas se aprovechan por sus tallos. No forman cabezas y tiene tallos carnosos prominentes y engrosados que acaban en unas hojas lanceoladas verticales de 4 a 10 cm de diámetro y hasta 60 cm de alto. Son cultivadas en Chica donde son muy apreciadas.



Imagen 1.4. Lechuga tipo de tallo o espárrago.

- Lechuga tipo española o Trocadero (Imagen 1.5), también denominada lechuga Butterhead (mantecosa), forma una pequeña cabeza poco compacta de hojas casi esféricas rodeadas de hojas con cierta tendencia envolvente. Las hojas son anchas, arrugadas, relativamente finas y tiernas. La textura de las hojas es suave y aceitosa. El grupo Butterhead es ampliamente utilizado en Europa.



Imagen 1.5. Lechuga tipo española o Trocadero.

- Lechuga tipo Hoja de Roble (Imagen 1.6). Este tipo de lechuga no forma cogollo y se caracteriza por la suavidad de sus hojas. Se cultivan preferentemente en hidropónico debido a su corto periodo de crecimiento. Son lechugas muy apreciadas en ensalada por sus variados colores y formas.



Imagen 1.6. Lechuga tipo Hoja de Roble.

- Lechuga tipo Little Gem (Imagen 1.7). Son lechugas de pequeño tamaño, cuyas hojas forman primero una roseta para después dar paso a un cogollo compacto de unos 80 g en el momento de la recolección. De color verde medio a verde oscuro, presentan hojas sésiles con bordes lisos o ligeramente ondulados y nervaduras bastante marcadas.



Imagen 1.7. Lechuga tipo Little Gem.

1.1.2. Origen y domesticación

La domesticación de los cultivos para conseguir alimentos se basa en la selección que hace el ser humano de aquellos rasgos deseables de las plantas como la producción, sabor, calidad nutricional o la tolerancia a patógenos y enfermedades (Gepts, 2014). Se tiene constancia de plantas de lechuga, por representaciones en pinturas murales de tumbas egipcias, hacia el año 2.500 a.C., por lo que es una de las especies vegetales cultivadas más antiguas que se conocen (Lindqvist, 1960; Wei y col., 2021). El centro de origen de *Lactuca sativa* y su domesticación han sido objetivos de numerosos estudios desde principios de siglo XX. En cuanto a su centro de origen han sido varias las áreas propuestas como candidatas en diversos estudios: Egipto (Lindqvist, 1960), Mesopotamia (Boukema y col., 1990), áreas de la cuenca Mediterránea (Ryder, 1986), India (Rodenburg, 1960) o Kurdistan-Mesopotamia (De Vries, 1997). Algunos estudios indican que el origen de la lechuga cultivada es polifilético (De Vries, 1997), resultado de la selección humana dentro de un gran acervo genético a partir de *Lactuca serriola*, con la introgresión simultánea de genes de otras especies del género *Lactuca* (Lindqvist, 1960). Sin embargo, la historia de la domesticación de la lechuga que se cultiva en la actualidad y su base genética siguen siendo en gran medida desconocidas (De Vries, 1997; Wei y col., 2021). Las últimas investigaciones (ver Ilustración 1.1) indican que la lechuga se domesticó por primera vez cerca del Cáucaso hace unos 6.000 años como cultivo para la obtención semillas. Se cree que *Lactuca serriola* jugó un papel fundamental en la mejora del cultivo durante su expansión por Europa (Wei y col., 2021). Se llegó a esta conclusión tras el análisis de las secuencias del genoma de 445 tipos de lechuga y su reserva genética silvestre salvaje (Wei y col., 2021). A partir del Cáucaso, el cultivo de la lechuga se fue extendiendo geográficamente (Ilustración 1.1) y sufriendo un proceso de mejora gracias a los agricultores que iban seleccionando las plantas más aptas para

la extracción de semillas y la producción de más plantas. Del Cáucaso llega a Egipto a través del suroeste asiático, convirtiéndose en un cultivo de cierta importancia para la sociedad egipcia. Sus semillas fueron usadas para la obtención de aceite, como afrodisíaco, en ritos y sacrificios relacionados con la fertilidad y la procreación (Harlan, 1986).

Desde Egipto se extendió a Grecia y Roma (Lindqvist, 1960), resultado de las relaciones comerciales de la época en el entorno mediterráneo. Griegos y romanos cultivaron lechugas de hoja larga, presumiblemente del tipo Cos (Helm, 1954) durante todo el año, aunque la consideraban un alimento ideal para los meses más calurosos por su frescura, conservándose en miel y vinagre para el invierno (Verdú y Cisneros, 2007). En esta época era consumida tanto cruda como cocida, considerada antiafrodisíaca y soporífera, y con propiedades medicinales relacionadas con una buena digestión (Harlan, 1986). También fue usada como forraje y sus semillas para la elaboración de aceite.

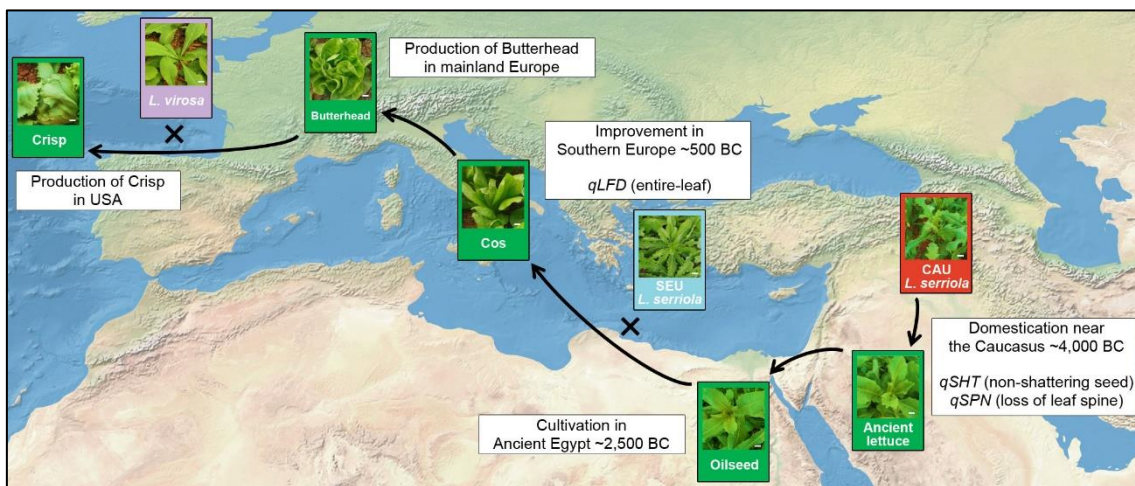


Ilustración 1.1. Historia de la domesticación y reproducción de la lechuga (Wei et al., 2021).

Una vez en Europa central fue utilizada por todas las culturas y sociedades hasta nuestros días. Paradójicamente, no existen referencias a su cultivo y consumo hasta la publicación en 1485 del Gart der Gesundheit (Hortus sanitatis en latín) de Peter Schöffer (Imagen 1.8.a y 1.8.b), en el que se describen cuatro tipos de lechuga que no guardan ningún parecido con las cultivadas actualmente. Posteriormente, ya en el siglo XVI, los botánicos de la época centraron sus estudios y publicaciones en el valor que las plantas tenían para el hombre, tanto alimentario como medicinal (Stace, 1980). Surgen varias descripciones de la lechuga, haciendo referencia a autores de Grecia y Roma (Helm, 1954) como Teofrasto, Plinio, Dioscórides o Galeno; que solían ir acompañadas de ilustraciones de la planta. La primera evidencia de la existencia de la lechuga repollera proviene de la descripción de Fuchs en su herbario Das Kräuterbuch en 1543 (Helm, 1954) (Imagen 1.8.c y 1.8.d), de las que se cree que se originaron las lechugas tipo trocadero e iceberg (Carrasco, 2016). En siglos posteriores, la lechuga fue bastante producida y consumida por colonias judías, musulmanas y cristianas de la península ibérica (Verdú, 2007)

consumiéndolas en ensalada de forma muy parecida a como se hace en la actualidad. Los cultivares europeos más antiguos son cultivares franceses de 1755 “Passion Blonde a Graine Blanche” y de 1771: “Palatine” de la colección del Centro de Recursos Genéticos de Holanda (CGN) de la Universidad de Wageningen (Boukema y col., 1990).

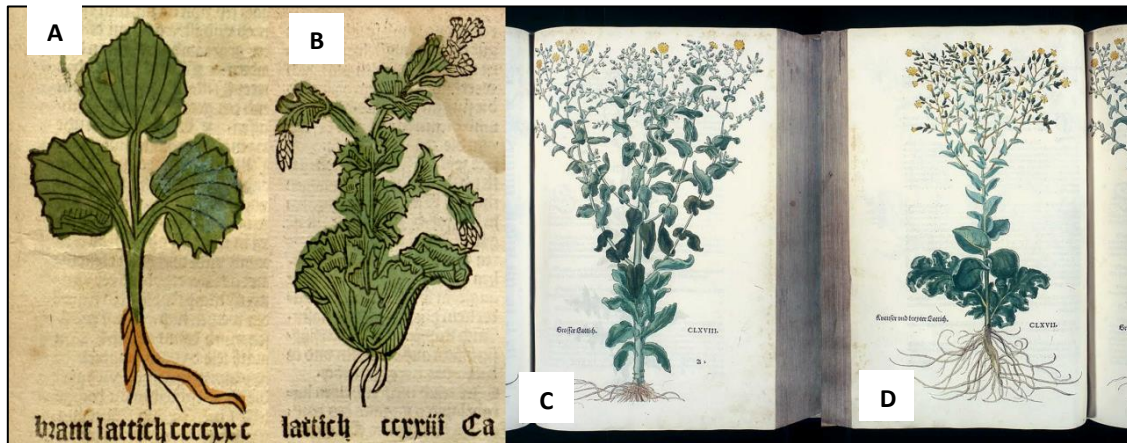


Imagen 1.8. Primeras ilustraciones conocidas de lechuga aparecidas en Europa. A y B: *Gart der Gesundheit* de Peter Schöffer (1485). C y D: *Das Kräuterbuch* de Fuchs (1543).

En China se introdujo entre el siglo VI y el X (Helm, 1954), donde se seleccionó un tipo de lechuga caracterizada por un tallo grueso y succulento (Harlan, 1992) que era cocinado para su consumo. A esta lechuga se le atribuyen propiedades digestivas y antiinflamatorias (Han y col., 2010). Alrededor del siglo XIX, esta lechuga de tallo se introdujo en Europa, pero fracasó como cultivo (Oost, 1980).

En la actualidad, la lechuga es una de las hortalizas más consumidas en todo el mundo (Pinto y col., 2014) y cada vez en cantidades mayores debido a los beneficios que su consumo implican para la salud (DuPont y col., 2000) lo que la convierte en componente básico en la dieta mediterránea (Carrasco, 2016). Es el cultivo más importante del grupo de las hortalizas de hoja (Křístková y col., 2008), estando presente en casi todo el mundo (Mou, 2008). Se consume en ensalada, como guarnición en muchos platos o en bocadillos (Mou, 2008). Un hecho destacado es el constante crecimiento del consumo de ensaladas de IV gama (Damerum y col., 2020; Stuart, 2011) como consecuencia de los cambios en los hábitos de consumo, que exige al mercado lechugas con variedad de colores, texturas y sabores. En los últimos tiempos se está consumiendo como zumo (Jockel-Schneider y col., 2016). Esta demanda creciente y heterogénea hace que la industria de la mejora genética tenga que responder con la creación de nuevas variedades de lechuga con mayor valor añadido que satisfagan las demandas del consumidor pero también del agricultor, ofreciendo nuevas variedades con mejores cualidades organolépticas pero también con resistencias a ciertas enfermedades y plagas, adaptadas a diferentes sistemas de cultivo y diferentes condiciones climáticas e incluso adaptadas a la mecanización la labores de campo.

1.1.3. Producción y superficie cultivada

La lechuga es el cultivo más importante del grupo de las hortalizas de hoja (Křístková y col., 2008). Se produce comercialmente en muchos países alrededor de todo el mundo y también es cultivada ampliamente como verdura en los huertos familiares (Rubatzky y Yamaguchi, 1997). Es especialmente importante como cultivo comercial en Asia, América del Norte y Central, y Europa. El cultivo mundial de lechuga en el año 2019 fue de 29.138.977 tm, siendo los principales productores China, EEUU, India, España e Italia, con 16.314.499, 3.688.520, 1.262.702, 1.009.810 y 758.980 tm respectivamente (FAOSTAT, 2021; Tabla 1.2). La superficie mundial cultivada fue de 1.984.742 ha en 2019 (FAOSTAT, 2021). En los últimos 60 años se ha producido un aumento del 440% en la producción mundial de lechuga (Figura 1.1), pasando de las 6.616.339 tm producidas en 1961 a las 29.134.653 tm producidas en 2019 (FAOSTAT, 2021). En las últimas dos décadas (2000-2019) el aumento ha sido del 158%, pasando de las 18.398156 tm producidas en el año 2000 a las 29.134.653 tm producidas en 2019 (FAOSTAT, 2021).

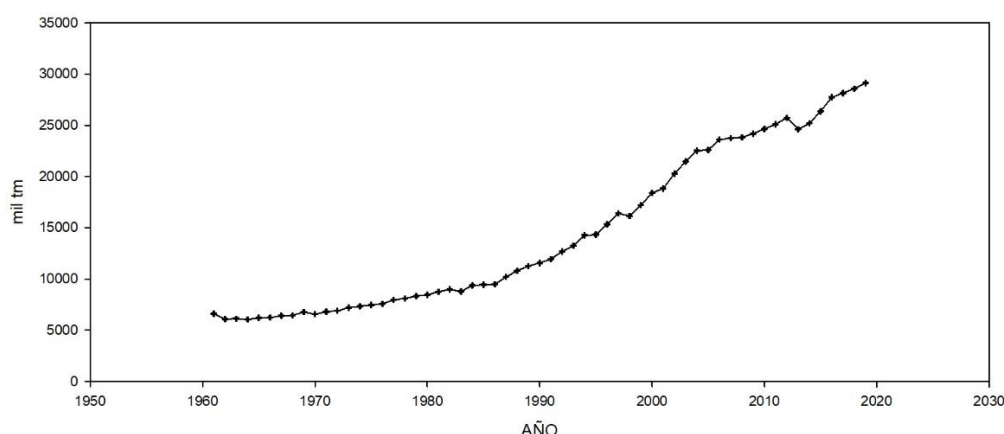


Figura 1.1. Evolución mundial de la producción (miles de tm) de lechuga en el periodo 1961-2019 (FAOSTAT, 2021).

A continuación, en la Tabla 1.2, se muestra la producción, la superficie cultivada y los rendimientos de los diez principales países productores de lechuga en el mundo (FAOSTAT, 2021).

Tabla 1.2. Producción (tm), superficie cultivada (ha) y rendimiento (tm/ha) de lechuga en los principales países productores en 2019 (FAOSTAT, 2021).

PAÍS	PRODUCCIÓN (tm)	SUPERFICIE (ha)	RENDIMIENTO (tm/ha)
China	16.314.499	668.714	24,40
Estados Unidos	3.688.520	105.100	35,10
India	1.262.702	199.778	6,32
España	1.009.810	35.360	28,56
Italia	758.980	33.690	22,53
Japón	582.416	21.384	27,24
Irán	547.590	17.962	30,49
Bélgica	527.250	11.520	45,77
México	515.647	20.778	24,82
Turquía	499.766	23.335	21,42

En dicha tabla se puede observar la brecha que existe entre China, Estados Unidos, India y España con respecto al resto de productores. De los grandes productores mundiales, en cuanto al rendimiento, destacan Bélgica, Estados Unidos, Irán, España y Japón. Por otro lado, se percibe la disparidad de rendimientos entre los diferentes países productores, de las 45,77 tm/ha en Bélgica a las 6,32 tm/ha producidas en la India.

El cultivo de lechuga en España ha ido aumentando progresivamente (Tabla 1.3) en los últimos años, tanto en su producción como en su diversificación de nuevas variedades para IV gama (Damerum y col., 2020; Stuart, 2011). En 2019, las Comunidades Autónomas de la Región de Murcia (15.895 has en cultivo de lechuga) y Andalucía (10.044 has en cultivo de lechuga) fueron las mayores productoras a nivel nacional, obteniendo 422.517 y 268.662 tm respectivamente (MAPA, 2021). En el caso de Andalucía, la producción se centra fundamentalmente en la provincia de Almería y Granada, que representa el 81% del total andaluz (MAPA, 2021). En el periodo 2008-2019 la producción de lechuga ha experimentado un aumento en España del 24%, mientras que la superficie cultivada de lechuga ha experimentado un aumento del 13%, lo que se traduce en el aumento del rendimiento en un 10% para ese mismo periodo (Tabla 1.3).

Tabla 1.3. Producción (tm), superficie cultivada (ha) y rendimiento (tm/ha) de lechuga en España en el periodo 2010-2019 (MAPA, 2021).

AÑO	PRODUCCIÓN (tm)	SUPERFICIE (ha)	RENDIMIENTO (tm/ha)
2008	889.233	32.860	27,06
2009	852.988	32.557	26,20
2010	809.390	31.256	25,90
2011	868.436	32.620	26,62
2012	876.926	33.196	26,42
2013	904.283	33.669	26,86
2014	904.802	33.924	26,67
2015	927.378	34.314	27,03
2016	929.944	33.646	27,64
2017	976.112	34.508	28,29
2018	934.670	33.674	27,76
2019	1.009.810	35.360	28,56

La Región de Murcia es la primera comunidad productora a nivel nacional con 404.246 tm producidas en 2020 (CREM, 2021; Fig. 1.2) y concentra más de la mitad de la producción en los municipios de Lorca, Águilas, Cartagena, Torre-Pacheco y Fuente Álamo. La producción ha experimentado un fuerte incremento en los primeros años de la última década, sufriendo un ligero descenso a partir del 2017.

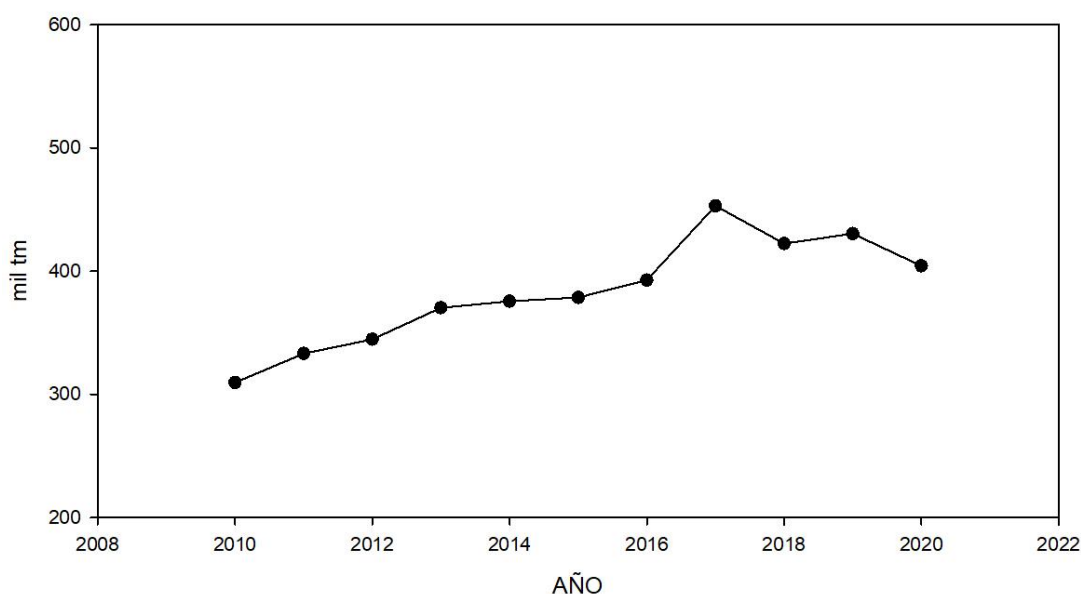


Figura 1.2. Evolución de la producción (miles de tm) de lechuga en la Región de Murcia en el periodo 2010-2020 (CREM, 2021).

La producción en la Región de Murcia se concentra fundamentalmente en cinco municipios (Tabla 1.4), destacando Lorca (Valle del Guadalentín) y Águilas (Marina de Cope y los Arejos), con el 34 % de la producción regional. Por detrás destacan Cartagena, Torre Pacheco y Fuente-álamo (Campo de Cartagena). Estos cinco municipios juntos suponen el 55% de la producción regional.

Tabla 1.4. Producción (tm) y superficie cultivada (ha) de lechuga por municipios de la Región de Murcia en 2020 (CREM, 2021).

MUNICIPIO	PRODUCCIÓN (tm)	SUPERFICIE (ha)
Lorca	69.191	2.437
Águilas	67.147	2.365
Cartagena	34.496	1.215
Torre-Pacheco	26.717	941
Fuente Álamo	25.127	885
Otros	181.567	6.395
TOTAL REGIÓN DE MURCIA	404.245	14.238

1.1.4. Composición y valor nutricional

La composición química de un alimento influye en su calidad nutritiva y funcional, que hace referencia a la contribución que realiza dicho alimento al adecuado funcionamiento del organismo de las personas y a su salud. Actualmente, son muchos los estudios que intentan mejorar la calidad de las lechugas, ya que el mercado y los consumidores son cada vez más exigentes y demandan productos más saludables y nutritivos (Gruda, 2005).

El consumo de lechuga es uno de los principales integrantes de una dieta saludable, aportando agua y otros compuestos beneficiosos para la salud humana con un escaso aporte calórico. Es una fuente importante de compuestos fenólicos, vitaminas A, B₁, B₂, C y E, así como fuente de hierro y potasio (Pinto y col., 2014b) y compuestos antioxidantes (Tomás-Barberán y col., 1997). El creciente interés por el consumo de lechuga se relaciona con el contenido de compuestos bioactivos que posee y sus efectos beneficiosos para el ser humano (Ferrerres y col., 1997). El consumo regular de lechuga mejora la protección contra el cáncer, enfermedades cardiovasculares y otras enfermedades crónicas (Nicolle y col., 2004). La composición de una lechuga varía con el color, siendo las variedades rojas las que tienen un mayor contenido fenólico y carotenos (Llorach y col., 2008). El tipo de hoja también afecta a su contenido dentro de una misma lechuga, siendo las hojas externas más ricas en nutrientes que las internas (Hohl y col., 2001). Factores genéticos, las prácticas de cultivo, y la manipulación y conservación postcosecha también influyen en su contenido nutricional (DuPont y col., 2000; S. K. Lee y Kader, 2000). A continuación, en la Tabla 1.5 se muestran los valores nutricionales de la lechuga por cada 100 gramos de hoja:

Tabla 1.5. Valor nutricional por tipos de lechuga por cada 100 g de porción comestible (USDA, 2021).

Nutrientes	Iceberg	Romana	Trocadero	Hoja de roble
Agua (%)	95,64	94,7	95,63	94,98
Energía (kcal)	14,00	20,00	13,00	15,00
Proteína (g)	0,90	1,24	1,35	1,36
Lípidos totales (g)	0,14	0,26	0,22	0,15
Carbohidratos (g)	2,97	3,24	2,23	2,87
Fibra (g)	1,20	1,8	1,10	1,30
Azúcar (g)	1,97	1,19	0,94	0,78
Calcio (mg)	18,00	35,00	35,00	36,00
Hierro (mg)	0,41	0,95	1,24	0,86
Magnesio (mg)	7,00	13,70	13,00	13,00
Fósforo (mg)	20,00	30,00	33,00	29,00
Potasio (mg)	141,00	253,00	238,00	194,00
Zinc (mg)	0,15	0,25	0,20	0,18
Cobre (mg)	0,05	0,05	0,05	0,05
Manganeso (mg)	0,13	0,13	0,13	0,13
Vitamina C (mg)	2,80	4,60	3,70	9,20
Tiamina (mg)	0,04	0,08	0,06	0,07
Riboflavina (mg)	0,02	0,07	0,06	0,08
Niacina (mg)	0,12	0,32	0,36	0,37
Folato (µg)	29,00	50,00	73,00	38,00
Vitamina A (µg)	502,00	436,00	3312,00	7405,00
Vitamina E (mg)	0,18	0,14	0,18	0,22
Vitamina B-6 (mg)	0,04	0,14	0,08	0,09
Vitamina K (µg)	24,10	102,00	102,30	126,30

1.2. El cultivo hidropónico

1.2.1. Definición

El cultivo sin suelo se define como cualquier método de cultivo en el que, a diferencia de la agricultura tradicional, el desarrollo de las plantas se realiza sin utilizar el suelo como medio físico de sostén y enraizamiento (Benton Jones, 2014; Resh, 2013), de forma que las plantas pueden crecer en diferentes tipos de sustratos o sobre líquido (Jan y col., 2021). En ambos casos, todas las necesidades nutricionales de las plantas se suministran a través de la solución nutritiva (Kaiser y Ernst, 2012), que contiene fertilizantes disueltos en concentraciones adecuadas (Jan y col., 2021; Savvas, 2003). El concepto de cultivo sin suelo y la terminología usada son bastante amplios, conociéndose coloquialmente como cultivos hidropónicos (Urrestarazu, 2004, 2015). Cultivo sin suelo e hidroponía suelen usarse como sinónimos (Urrestarazu, 2015), con el resultado de una indefinición en la literatura, encontrándose ambos términos usados en los mismos sentidos, a pesar de tener una serie de diferencias (Urrestarazu, 2015). Por tanto, se hace necesario establecer un consenso que clarifique la terminología (Larsen, 2008). El cultivo en sustrato a menudo se denomina de forma general “cultivo sin suelo”, mientras que el cultivo en solución nutritiva a raíz desnuda debería ser considerado como la verdadera “hidroponía” (Resh, 2013). Desde un punto de vista práctico, la clasificación de los cultivos sin suelo se realizan en general atendiendo a los criterios básicos de manejo del sistema radical de las plantas (Urrestarazu, 2004, 2015). Generalmente se diferencian dos grandes sistemas dentro del cultivo sin suelo: el cultivo en sustrato y el cultivo en solución nutritiva o hidropónico (Olubango y Alade, 2018), cada uno de los cuales, a la vez, puede presentar una serie de variaciones que desarrollan la clasificación de estos sistemas de cultivo. El cultivo hidropónico (Imagen 1.9; Resh, 2013) consiste en una forma de sub-irrigación en la que las plantas quedan apoyadas y fijadas en bandejas que flotan sobre la solución nutritiva, de forma que sus raíces se encuentran inmersas en dicha solución nutritiva (Nicola y Fontana, 2007). Todas las necesidades nutricionales de las plantas se suministran a través de la solución nutritiva (Kaiser y Ernst, 2012), que contiene fertilizantes disueltos en concentraciones adecuadas (Jan y col., 2021; Savvas, 2003).



Imagen 1.9. Cultivo hidropónico de lechuga a raíz desnuda en solución nutritiva.

1.2.2. Sistemas de cultivo hidropónico

En hidroponía existen varios métodos que han tenido éxito comercial para la producción de lechuga (Kaiser y Ernst, 2012) y de otras hortalizas de hoja (Nicola y Fontana, 2007; Öztekin y col., 2018; Petropoulos y col., 2016), basados en la forma en la que se pone la SN a disposición de la planta. Los principales sistemas de cultivo hidropónico son los siguientes:

- Nutrient Film Technique (NFT). Es un sistema basado en mantener un flujo laminar de 1-2 mm de SN continuamente en recirculación, pasando a través de las raíces de la planta de forma que le aporta agua, nutrientes y oxígeno. Para la instalación de este tipo de sistemas se emplean canales con una ligera pendiente que permite la circulación de la solución por gravedad tal y como se puede observar en la Ilustración 1.2:

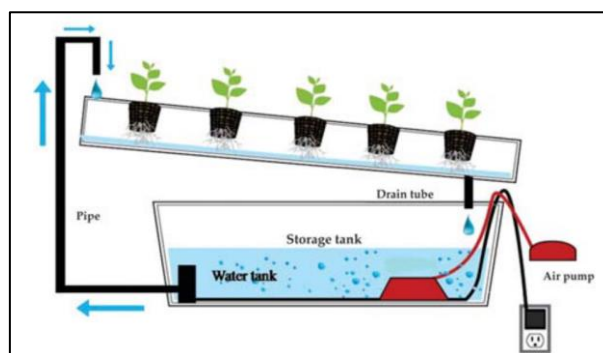


Ilustración 1.2. Esquema de sistema NFT (Sharma y col., 2018).

- Sistema flotante. Consiste en mantener las raíces de la planta suspendidas en todo momento en solución nutritiva convenientemente oxigenada (Ilustración 1.3; Öztekin y col., 2018). Las plantas quedan apoyadas y fijadas en bandejas que flotan sobre la solución nutritiva, de forma que sus raíces se encuentran inmersas en la misma (Nicola y Fontana, 2007). Se considera un método de cultivo óptimo para la obtención de hortalizas de hoja limpia (Nicola y Fontana, 2007; Scuderi y col., 2009), mínimamente procesadas (Petropoulos y col., 2016) y de alta calidad y valor añadido (Nicola y Fontana, 2007). Además, es el método que se utiliza habitualmente en la producción de plántulas (Bilalis y col., 2009; Carrasco y col., 2003; Petropoulos y col., 2016) y en investigación de nutrición y fisiología vegetal (Benton Jones, 2008). Para una correcta oxigenación y mantenimiento de los nutrientes minerales la solución nutritiva. ésta se incorpora periódicamente a la zona radicular. El aumento de volumen provocará que suba el nivel y descargue la solución “ya usada” mediante un desagüe rebosadero de vuelta al tanque.

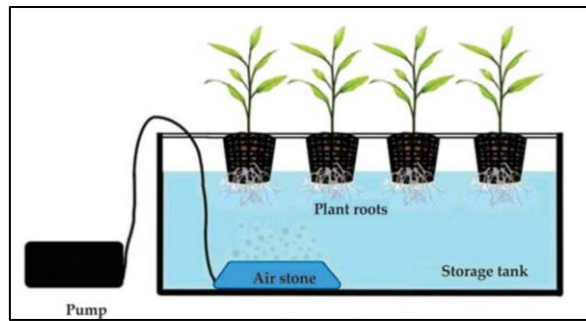


Ilustración 1.3. Esquema de sistema flotante (Sharma y col., 2018).

- Sistema flujo-reflujo. El flujo-reflujo (ebb and flow para los anglosajones) es una técnica de manejo del aporte de solución nutritiva ampliamente empleada en las diferentes modalidades de sistemas de cultivo hidropónico (Ilustración 1.4; Weaver y col., 2015). Son diversas las variantes existentes de esta técnica, si bien su uso generalizado consiste en la inundación momentánea con solución nutritiva de la zona radicular del cultivo, siendo posteriormente drenada y recuperada en un depósito. De esta forma, se produce una alternancia de periodos en los que la zona radicular está totalmente inmersa en solución nutritiva con periodos en los que las raíces deben desarrollarse al aire libre con la humedad resultante del periodo anterior. La investigación de esta técnica está muy ligada a cultivos de sub-irrigación de plantas en sustrato, tanto para cultivos de ornamentales (Miller y col., 2011; J. R. Pinto y col., 2008), como de cultivos agrícolas (Liu y col., 2012; Nicola y col., 2004; Sapkota y col., 2019; Nicola, 2007; Yang y col., 2018). Se ha demostrado que cultivos de lechuga con un sistema de flujo-reflujo conlleva efectos positivos en varios parámetros de crecimiento de lechuga, al aumentar significativamente el nivel de vitamina C y disminuir el contenido de nitratos de las hojas en comparación con el riego por aspersión (Yang y col., 2018). En los últimos años se está introduciendo su uso en investigación en sistemas hidropónicos a raíz desnuda, que comparan sistemas de cultivo flujo-reflujo y flotantes para diversos vegetales de hoja (Nicola y col., 2007).

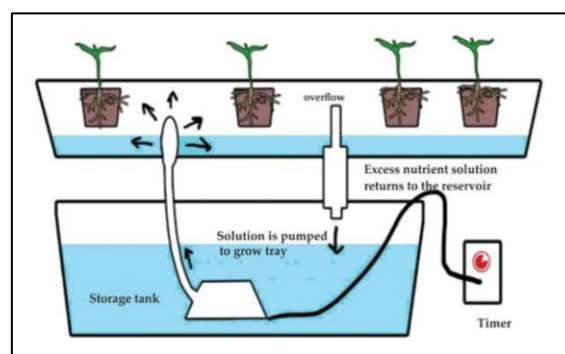


Ilustración 1.4. Esquema de sistema flujo-reflujo (Sharma y col., 2018).

- Goteo o riego aéreo. La solución nutritiva es suministrada directamente a las raíces de las plantas mediante el uso de goteros (Ilustración 1.5). La filosofía es la misma que tiene el riego por goteo en suelo o en sustrato, con la diferencia que aquí se prescinde de ambos, dejando la raíz

desnuda. El agua pasa del gotero directamente a la raíz desnuda y el drenaje ocasionado es devuelto a la cuba de riego para su reutilización en riegos posteriores.

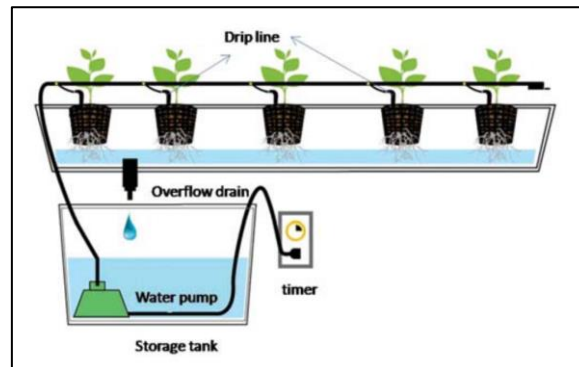


Ilustración 1.5. Esquema de sistema por goteo (drip system) (Sharma y col., 2018).

- **Aeroponía.** Este sistema consiste en rociar las raíces de las plantas con solución nutritiva mediante aspersores o difusores (Ilustración 1.6; Christie y Nichols, 2004; Mattson y Heinrich Lieth, 2019), ya sea de forma continua o a ciertos intervalos de tiempo (Mattson y Heinrich Lieth, 2019). Las raíces de las plantas se encuentran colgando en un entorno cerrado en total oscuridad, separadas de la parte aérea de la planta por la estructura que sirve de sostén a la planta. Este espacio cerrado es compartido por las raíces con el sistema de riego.

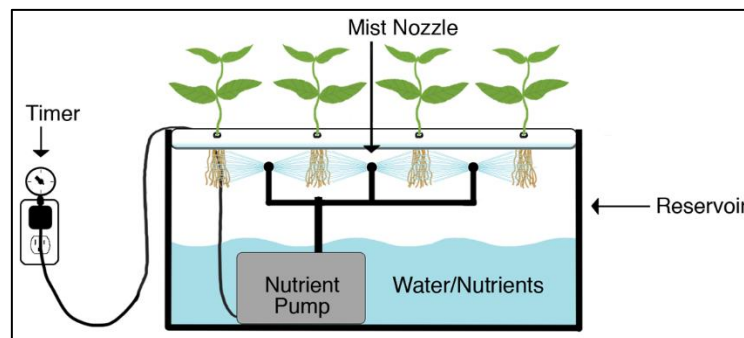


Ilustración 1.6. Esquema de sistema aeropónico (Sharma y col., 2018).

Todos los sistemas tienen en común la necesidad de poner a disposición de la planta la solución nutritiva, de asegurar niveles aceptables de oxígeno disuelto, proporcionar oscuridad a la raíz de la planta y de dar un soporte físico a la planta como sustituto del soporte físico que da el suelo en el cultivo tradicional en suelo o en el cultivo sin suelo en sustrato (Resh, 2013).

- **Cultivo hidropónico vertical de lechuga.** En los últimos años, se han empezado a instalar y a investigar en los cultivos hidropónicos verticales en interior con luz artificial, generalmente luces LED, que suponen la máxima expresión en la búsqueda de un aumento de los rendimientos productivos en estos sistemas de cultivo. Esta expansión exponencial del cultivo vertical no solo atañe al cultivo interior en edificaciones, sino que también está implicado el cultivo en invernaderos (Butturini y Marcelis, 2019) e incluso al aire libre, pudiendo ser los invernaderos

incluso más eficientes en términos de energéticos (Graamans y col. 2018). Por ejemplo, cada vez es más frecuente aumentar la densidad del cultivo de fresa y lechuga usando estos cultivos verticales (Imagen 1.10, 1.11). La lechuga se considerada como la hortaliza de hoja que mejor se adapta al cultivo hidropónico (Petropoulos et al., 2016).



Imagen 1.10. Cultivo hidropónico vertical de fresa desarrollados por la empresa NGS en A) Colombia y B) Laos.

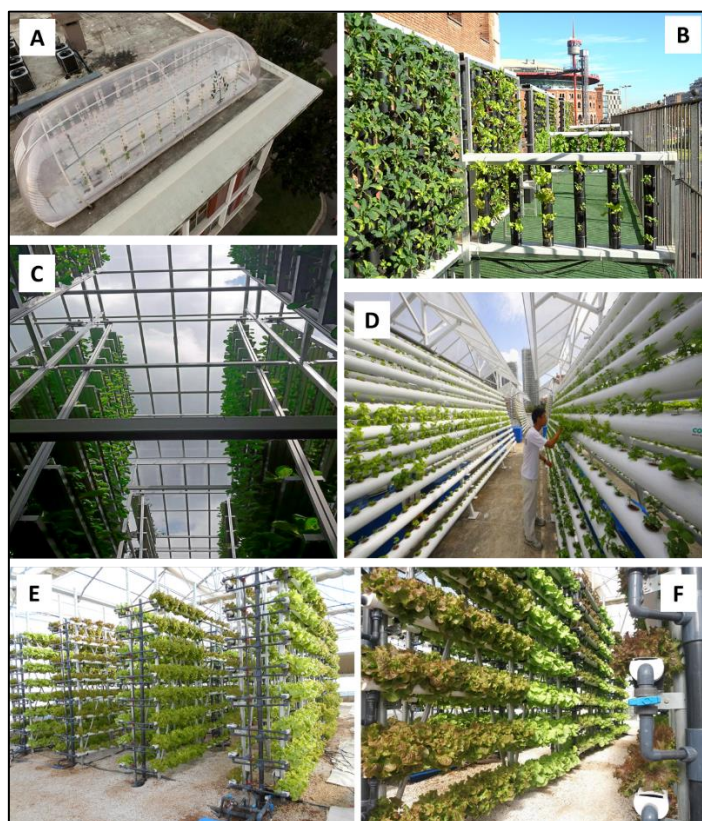


Imagen 1.11. Diferentes cultivos verticales hidropónicos de lechuga a raíz desnuda en solución nutritiva: A) Invernadero de lechuga en azotea de edificio con estructuras verticales columnares en el norte de Italia, B) Cultivo vertical de lechuga en azotea de Barcelona (España), C) Cultivo vertical de lechuga en Singapur, D) Cultivo vertical de lechuga en Yakarta (Indonesia), E) y F) Cultivo vertical de lechuga en instalaciones del CEBAS-CSIC en Santomera (España).

En un cultivo de lechuga vertical en invernadero uno de los factores claves en el diseño de estas estructuras son la densidad de plantación y altura de cultivo puesto que tienen una influencia clara en la incidencia de luz sobre las plantas: al aumentar la densidad de plantas y descender en altura se prevé que el crecimiento disminuya como efecto de una reducción de la radiación incidente acumulada. La alta inversión económica que requieren los sistemas de cultivo hidropónico (Chanu y col., 2020; Dunn, 2015) justifica la búsqueda de soluciones que aprovechen el espacio en las instalaciones para lograr un alto rendimiento por superficie cultivada, lo que se traduce en la puesta en marcha en ocasiones de cultivos verticales que aumentan la densidad de plantación y por tanto, los rendimientos del cultivo por superficie. En cuanto a cultivo vertical en invernadero con un sistema flotante con recirculación de solución nutritiva no existen gran cantidad de estudios, centrándose la labor investigadora en cultivos verticales de interior apoyados con luz artificial. No obstante, Touliatos y col. (2016) estudiaron un cultivo vertical de lechugas en columnas cilíndricas y establecieron una comparación con un sistema de cultivo hidropónico horizontal, ambos en un ambiente interior controlado y apoyado por luz artificial. Tras su investigación observaron que el cultivo vertical proporcionó mayores rendimientos que el cultivo horizontal. En definitiva, el mayor reto ante el que se encuentra la producción de lechuga en hidropónico es la de incrementar sus rendimientos por unidad de superficie a la misma vez que se mejora la calidad organoléptica y nutricional con los menores insumos posibles (agua, fertilizantes, fitosanitarios, energía) y respetando el medioambiente evitando la contaminación por nitratos y otros fertilizantes de los recursos naturales como suelo, acuíferos, lagunas, mares, etc.

1.2.3. Ventajas y desventajas del cultivo hidropónico

Los sistemas de cultivo hidropónico tienen muchas ventajas sobre los sistemas de cultivo tradicional en suelo (S. Lee y Lee, 2015):

- Favorecen el desarrollo del cultivo, obteniendo mayores rendimientos y cosechas más precoces (Eigenbrod y Gruda, 2015; Fernández y col., 2008; Jan y col., 2021; Nicola y Fontana, 2007; Okemwa, 2015; Öztekin y col., 2018; Putra y Yuliando, 2015; Swain y col., 2021; Tambakhe y Gulhane, 2020; Tomasi y col., 2015). El control total de la nutrición permite poner a disposición de la planta los nutrientes que necesita en el momento preciso sin intervención de elementos más difícilmente controlables como el suelo, facilitando así la corrección de deficiencias nutricionales o toxicidades en las plantas (Adrover y col., 2013; De Carvalho y col., 2015; Fontana y Nicola, 2009; Nicola y Fontana, 2007). Además, al tomar la planta directamente los nutrientes de la solución nutritiva consume menos energía para su desarrollo que en los sistemas de cultivo en suelo (Baixauli y Aguilar, 2002; Barbosa y col., 2015). Se obtiene una relación aire/agua óptima en la zona radicular (Baixauli y Aguilar, 2002). Desde el punto de vista práctico, la hidroponía permite montar cultivos en altura, aumentando la densidad de plantación

(Baixauli y Aguilar, 2002), lo que es un sistema óptimo en invernaderos permitiendo también el cultivo fuera de temporada (Manzocco y col., 2011).

- Mejora en la calidad del cultivo. El entorno controlado en el que se desarrolla el cultivo permite una producción más homogénea (Fernández y col., 2008; Öztekin y col., 2018; Tomasi y col., 2015) y de mayor calidad (Chanu y col., 2020; Jan y col., 2021; Savvas, 2003; Tambakhe y Gulhane, 2020). El sabor y el valor nutritivo de los productos finales es generalmente superior al cultivo tradicional en suelo (Chanu y col., 2020; Jan y col., 2021; Swain y col., 2021). Al recolectar, se obtienen productos más limpios, lo que se simplifican algunas labores postcosecha.
- Mejora medioambiental. Los sistemas hidropónicos consiguen una mejor gestión del agua (Eigenbrod y Gruda, 2015; Tomasi y col., 2015), que se maximiza cuando se implantan sistemas cerrados, en los que la reutilización de drenajes evita la contaminación de suelo y acuíferos (Fontana y Nicola, 2009; Savvas, 2003; Swain y col., 2021; Treftz y Omaye, 2016). La no intervención del suelo permite prescindir de desinfectantes (Baixauli y Aguilar, 2002; Savvas, 2003) y se reduce el uso de pesticidas durante el cultivo (Savvas, 2003). En los últimos años se está estudiando con cierto éxito cómo usar aguas residuales para el riego de las plantas, si bien los casos a escala real son aún limitados (Sukprasert, 2018).
- Ahorro económico. Además del beneficio para el medio ambiente, la puesta en marcha de sistemas de cultivo cerrados en los que se pueden reutilizar los drenajes también conlleva un importante ahorro económico. También se facilita el manejo del cultivo como podas o entutorados (Barbosa y col., 2015; Swain y col., 2021; Tambakhe y Gulhane, 2020), se suprimen trabajos de incorporación de abonos de fondo, preparaciones de suelo o eliminación de malas hierbas (Baixauli y Aguilar, 2002; Barbosa y col., 2015; Nguyen y col., 2016; Swain y col., 2021; Tambakhe y Gulhane, 2020) y se favorece la posibilidad de montar cultivos en altura facilitando en muchos casos la recolección.
- Mejora en la sanidad vegetal del cultivo al desaparecer enfermedades típicas del suelo. La ausencia de malas hierbas que puedan albergar vectores también incide en una mejora del estado sanitario de los cultivos.
- Permite la puesta en marcha de canales cortos de distribución, venta y consumo (Swain y col., 2021) al adaptarse bien a zonas urbanas o periurbanas al poder poner en marcha los cultivos en espacios comparativamente menores que en los sistemas de cultivo tradicional en suelo (Jan y col., 2021).

A pesar de las bondades que este tipo de cultivo presenta, la hidroponía tiene una serie de inconvenientes que en ocasiones pueden dificultar su instalación y puesta en marcha. El principal obstáculo a la hora de que un agricultor se decida por este tipo de cultivo son los mayores costes de instalación y puesta en marcha, que conlleva un mayor tiempo de amortización de la inversión realizada (Chanu y col., 2020; Dunn, 2015).

Desde el punto de vista fisiológico, la menor inercia térmica que existe en la zona radicular, al no haber suelo, hace que la raíces estén más expuestas a los posibles cambios de temperatura ambiental. Desde el punto de vista práctico, la ocurrencia de errores en la preparación y el manejo de la solución nutritiva puede resultar fatal para una plantación, por lo que se requiere gran precisión en el manejo, lo que conlleva una mayor formación (Dunn, 2015) del técnico/agricultor o la búsqueda de asesoramiento técnico externo. Además, un fallo en el sistema eléctrico puede acarrear la pérdida del cultivo (Chanu y col., 2020). En cuanto al estado sanitario de los cultivos, pueden aparecer enfermedades de raíz como por ejemplo el *Phyitium*, *Fusarium* y *Verticillium*, causando enanismo acusado e incluso pueden llegar a matar a las plantas. La aparición de algas y hongos en la solución nutritiva es muy común (Nielsen y col., 2006) y puede volverse un problema grave si no desinfecta la solución nutritiva convenientemente. Por último, las malas prácticas agrícolas pueden acarrear problemas medioambientales como la contaminación de suelos y acuíferos cuando en sistemas abiertos se descarga la solución hidropónica usada directamente al suelo. Las aguas residuales hidropónicas que se vierten en el entorno tienen el potencial de filtrarse en el suelo, lo que provoca la contaminación de las aguas subterráneas y afecta negativamente a los ecosistemas circundantes y al medio ambiente en su conjunto (Majid y col., 2021). Por último, las demandas de aireación de la solución nutritiva, la necesidad de electricidad y los cambios (aumento o disminución) de la temperatura de la solución nutritiva en función de las estaciones se consideran otras de las desventajas potenciales de los sistemas flotantes (Nicola y col., 2005; Rodríguez-Hidalgo y col., 2010). Durante las últimas décadas, la investigación ha aumentado de forma constante, especialmente en temas relacionados con la mejora de la productividad de los cultivos y la solución de las limitaciones que presentan (S. Lee y Lee, 2015). El crecimiento de la industria hidropónica, va ligado a la investigación de mejora de tecnologías que disminuyan los costes generales de puesta en marcha (Sharma y col., 2018).

1.2.4. La solución nutritiva en cultivos hidropónicos: composición y manejo

La solución nutritiva en estos cultivos contiene agua, oxígeno disuelto y los nutrientes minerales completamente disociados y en forma disponible para las plantas (Benton Jones, 2014; Resh, 2013; Santos y Ríos, 2016; Steiner, 1961). La elección de las sales y su concentración dependen de varios factores (Resh, 2013), no obstante, en este tipo de sistema de cultivo, cualquier solución nutritiva deberá contener los nutrientes esenciales que intervienen en los procesos fisiológicos de las plantas y que, por tanto, garantizan su desarrollo (Baixauli y Aguilar, 2002; Benton Jones, 2014; Resh, 2013). Estos nutrientes esenciales se clasifican en macronutrientes (principales y secundarios) y en micronutrientes tal y como se puede observar en la Tabla 1.6.

Tabla 1.6. Nutrientes esenciales que debe contener toda solución nutritiva para un sistema de cultivo hidropónico.

TIPO	NUTRIENTE ESENCIAL	FORMA DE ABSORCIÓN
MACRONUTRIENTE PRINCIPAL	Nitrógeno	NO_3^- y NH_4^+
	Fósforo	H_2PO_4^-
	Potasio	K^+
MACRONUTRIENTE SECUNDARIO	Azufre	SO_4^{2-}
	Calcio	Ca^{2+}
	Magnesio	Mg^{2+}
MICRONUTRIENTE	Hierro	Cationes divalentes o quelatos
	Manganeso	Cationes divalentes o quelatos
	Zinc	Cationes divalentes o quelatos
	Cobre	Cationes divalentes o quelatos
	Molibdeno	Cationes divalentes o quelatos
	Níquel	Cationes divalentes o quelatos
	Boro	H_3BO_3
	Cloro	Cl^-

En la literatura se describen varias soluciones hidropónicas que difieren en su composición de nutrientes y se utilizan para una amplia variedad de especies de plantas hortícolas: Hoagland (D. Hoagland y col., 1938), Hoagland y Arnon (D. R. Hoagland y Arnon, 1950), Steiner (Steiner, 1961), Benton Jones (Benton Jones, 2014), etc. Una de las soluciones nutritivas más utilizadas en investigación y producción comercial es la propuesta por Hoagland (1938; revisada en 1950 por D. R. Hoagland y Arnon, 1950). Esta solución fue de las primeras desarrolladas para los cultivos sin suelo y proporciona todos los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas y es apropiada para una amplia gama de especies. La solución descrita por Hoagland y Arnon (D. R. Hoagland y Arnon, 1950) ha sido modificado por varios autores, principalmente para añadir quelatos de hierro y cambiar la relación nitrato/amonio. Estas soluciones se pueden ver en la Tabla 1.7:

Tabla 1.7. Concentraciones de solución nutritiva propuesta por Hoagland y Arnon en 1938 y su modificación en 1950.

ELEMENTO	Hoagland y Arnon (1938)	Hoagland y Arnon (1950)
N (mmol/l)	15,00	12,00
P (mmol/l)	1,00	2,00
K (mmol/l)	6,00	6,00
Ca (mmol/l)	4,00	4,00
Mg (mmol/l)	1,40	2,00
S (mmol/l)	2,00	2,00
Fe (μmol/l)	45,00	107,00
Cu (μmol/l)	0,30	8,00
Zn (μmol/l)	0,75	7,70
Mn (μmol/l)	9,10	10,60
B (μmol/l)	46,25	50,00
Mo (μmol/l)	0,10	0,50

El manejo de la solución nutritiva durante el desarrollo del cultivo es fundamental para el éxito de los cultivos hidropónicos (Benton Jones, 2014), siendo necesario realizar una serie de

mediciones periódicas y controles rutinarios de diferentes parámetros (Barbosa y col., 2015). La concentración de los nutrientes es uno de los aspectos más importantes para el éxito de la producción de hortalizas de hoja, que junto con la temperatura, el pH y el oxígeno disuelto, pueden afectar al rendimiento y la calidad de la cosecha (Tomasi y col., 2015). En sistemas hidropónicos, las soluciones nutritivas tienen que ser calibradas y corregidas a lo largo del ciclo de cultivo para satisfacer la demanda de las plantas y garantizar la calidad y la cantidad de la producción. A continuación, se describen los principales factores que se controlan y gestionan en los cultivos hidropónicos:

• *pH*

El pH juega un papel fundamental en la disponibilidad de los nutrientes para las plantas (Santos y Ríos, 2016) y su regulación durante el cultivo puede evitar los estados carenciales de nutrientes (Baixauli y Aguilar, 2002). El pH apropiado de la solución nutritiva depende del tipo de cultivo, si bien, en general se considera un pH entre 5,5 y 6,0 como óptimo para una solución nutritiva de cultivo sin suelo (Santos y Ríos, 2016). Con pH superiores a 7 se ve afectada la absorción de calcio, fósforo y magnesio al disminuir su solubilidad y producirse precipitaciones (Amiri y Sattary, 2004); mientras que los microelementos hierro, cobre, cinc y manganeso pueden dejar de estar disponibles (Santos y Ríos, 2016). Con pH inferiores a 5 se pueden producir precipitaciones de las sales y se ve afectado el sistema radicular de las plantas (Santos y Ríos, 2016). Normalmente el pH se corrige añadiendo ácido nítrico o hidróxido sódico de alta concentración.

• *Conductividad eléctrica*

La conductividad eléctrica (CE, dS/m) es directamente proporcional a la concentración de sales disueltas en el agua, por lo que permite conocer de forma aproximada la cantidad de sales disueltas en la solución nutritiva. Su variación durante el ciclo de cultivo puede alertar de posibles desajustes en la concentración de nutrientes en la solución nutritiva que pueden provocar deficiencias o toxicidades. Por tanto, el control de este parámetro es muy importante para el buen desarrollo del cultivo (Santos y Ríos, 2016).

• *O₂ disuelto*

Existe una estrecha relación entre la concentración de oxígeno disuelto en la solución nutritiva y la productividad del cultivo (Urrestarazu, 2004, 2015). La cantidad de oxígeno que hay en la solución nutritiva depende de las condiciones ambientales y el tipo de cultivo. La diferencia entre la concentración de oxígeno de la solución nutritiva y la demanda por las raíces, determinará si el oxígeno presente puede convertirse en un factor limitante para el crecimiento de las plantas. En general, se suele considerar como óptimo un valor de 7-8 mg/l de oxígeno disuelto para la mayoría de las especies; mientras que valores por debajo de los 3-4 mg/l producen problemas de hipoxia que conllevan una disminución en el crecimiento radical y que limitan el crecimiento

general de la planta y la aparición de poblaciones de microorganismos no deseados como *Phytium* y *Phytophthora* (Gislerød y Kempton, 1983; Urrestarazu, 2015; Zeroni y col., 1983). Valores por encima de los 20 mg/l pueden afectar de forma negativa al crecimiento vegetal (Zheng y col., 2007).

• **Temperatura**

La temperatura de la solución nutritiva interviene en la capacidad de absorción de agua y nutrientes por las raíces de las plantas y pueden provocar una disminución en el crecimiento de las raíces cuando esta fuera del rango óptimo que es de 12 a 29 °C (Santos y Ríos, 2016), considerándose los 22 °C como la más adecuada. En la medida que la temperatura disminuye, la absorción y asimilación de los nutrimentos también lo hace (Cornillon, 1988). Por debajo de los 15 °C se presentan deficiencias principalmente de calcio, fósforo y hierro (Moorby y Graves, 1980) debido a la suberización de la endodermis de la raíz (Graves y Hurd, 1983). Algunos estudios apuntan a que incrementos en la temperatura de la zona radicular en cultivo de tomate y lechuga en climas fríos han provocado incrementos en el crecimiento de las plantas (Moorby y Graves, 1980). Por otro lado, la temperatura es el factor más importante en la concentración de oxígeno disuelto presente en la solución nutritiva (Urrestarazu, 2004, 2015) y en la cantidad que consumen las plantas. Un aumento de la temperatura de la solución nutritiva produce una disminución del oxígeno disuelto (Molitor y Fischer, 2001; Urrestarazu, 2004). En ocasiones, es difícil diferenciar cuando la temperatura de la solución nutritiva juega un papel directo sobre el crecimiento vegetativo de las plantas o lo hace en relación con su influencia en la concentración de oxígeno de la solución (Urrestarazu, 2004, 2015).

1.2.5. Casos de estudio del cultivo hidropónico de lechuga

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es la hortaliza de hoja más cultivada en sistemas hidropónicos (Barbosa y col., 2015; Jesse y col., 2019; Petropoulos y col., 2016). Estudios realizados en diferentes regiones del mundo demuestran que el empleo de este tipo de sistema de cultivo es una alternativa adecuada y viable al sistema tradicional en suelo (Majid y col., 2021). En los últimos años se ha experimentado un auge en el uso de este tipo de sistemas para la producción de lechugas y otras hortalizas de hoja para el sector de la IV gama. Hay varios sistemas de cultivo hidropónico que han tenido éxito comercial para la producción de lechuga, particularmente los sistemas flotantes y el Nutrient Film Technique (NFT) (Frasetya y col., 2021; Kaiser y Ernst, 2012; Safaei y col., 2015), que consiste en una fina película de solución nutritiva que fluye sobre las raíces y luego se recircula (Tabaglio y col., 2020). No obstante, las técnicas para la producción de hortalizas de hoja aún no se han estandarizado (Spehia y col., 2018) ni están suficientemente estudiadas (Petropoulos y col., 2016) por lo que se requiere seguir investigando sobre los diversos aspectos que afectan a este tipo de cultivo (Majid y col., 2021).

Las ventajas que aporta los sistemas de cultivo hidropónico en solución nutritiva frente al cultivo tradicional en suelo son considerables. En lechuga, al suspender la raíz en la solución nutritiva se favorece la absorción de agua y nutrientes de forma que se absorben con menor gasto energético para la planta y, por tanto, maximizando la energía dedicada al crecimiento (Sardare, 2013). Esto se traduce en un mayor tasa de crecimiento y de rendimiento del cultivo en comparación con los sistemas tradicionales de cultivo en suelo (Sharma y col., 2018). Algunos estudios como los de Barbosa y col. (2015) o Petropoulos y col. (2016) confirman la afirmación anterior. Por otro lado, la lechuga es una planta hortícola que suele consumirse directamente en fresco, por lo que la limpieza en el proceso de producción es una prioridad absoluta (Fraile-Robayo y col., 2017). En el cultivo hidropónico cerca del 99% de las hojas son válidas por lo que su valor es aproximadamente un 40% superior al de las lechugas cultivadas en suelo (Barbosa y col., 2015).

A pesar de las muchas ventajas, en comparación con el cultivo convencional en el suelo, existe una cierta preocupación por parte de los consumidores acerca de la calidad de las hortalizas cultivadas hidropónicamente con respecto a las cultivadas en suelo (Lei y Engeseth, 2021). Algunos estudios han demostrado peor calidad en lechuga hidropónica. Así Lei y Engeseth (2021) observó que las lechugas cultivadas hidropónicamente tenían menor concentración de componentes bioactivos, una menor capacidad antioxidante y una menor textura que aquellas cultivadas en suelo. Además, se ha visto que la capacidad antioxidante y el contenido total de antocianinas en la lechuga roja disminuyó en los sistemas de cultivo hidropónico (Zapata-Vahos y col., 2020). Por el contrario, otros estudios no encontraron diferencias significativas entre unas y otras (Murphy y col., 2011). Además, las plantas cultivadas hidropónicamente experimentan una mayor sensibilidad a la luz y al calor (Peet, 1999) y un mayor riesgo de aparición de “tipburn” que se muestra como quemaduras en los bordes de la hoja (Frantz y col., 2004).

La investigación del cultivo hidropónico de lechuga ha sido notable en los últimos años, especialmente centrándose en el rendimiento agronómico, calidad de la cosecha y en las limitaciones técnicas de estos sistemas (S. Lee y Lee, 2015; Swain y col., 2021). También hay numerosos estudios en los que se comparan y seleccionan el mejor sistema hidropónico para este cultivo. Majid y col. (2021) compararon en lechuga tres tipos de sistemas: flotante, NFT y cultivo tradicional en suelo, resultando el primero como el mejor en cuanto a precocidad del cultivo, tasa fotosintética y contenido en clorofilas. Ambos sistemas hidropónicos produjeron un rendimiento significativamente mayor y un producto nutricionalmente superior en menos tiempo que el sistema basado en el suelo. Sin embargo, hubo una reducción significativa en el contenido de materia seca en condiciones hidropónicas. Frasetya y col. (2021) analizaron cinco tipos de sistemas hidropónicos: NFT, variante de NFT con mayor altura de solución nutritiva, sistema flujo-reflujo, sistema flotante en balsa, y aeroponía, encontrando que el sistema NFT ofrecía

rendimientos de un 6-10% superiores que los sistemas flotantes. Yang y col. (2018) observó que el sistema de flujo-reflujo mejoró significativamente varios parámetros de crecimiento de la lechuga, a la vez que aumentó el nivel de vitamina C y disminuyó el contenido de nitrato de las hojas en comparación con un sistema de cultivo hidropónico basado en riego aéreo.

En la bibliografía destacan también los estudios sobre los efectos que tienen la diferente composición de la solución nutritiva en los parámetros productivos y de calidad de la lechuga. Petropoulos (2016) aplicó tres concentraciones diferentes de nitrógeno: 7,14, 10,71 y 14,29 mmol/l, observando que el aumento de concentración de nitrógeno produjo incrementos progresivos en la biomasa, la materia seca y en la concentración foliar de nitratos, K y Mg. En otro trabajo, se realizó un estudio con diferentes cultivares de lechuga de hoja verde y roja en los que se aplicaron tres niveles de conductividad eléctrica (1,0, 2,0 y 4,0 dS/m), resultando una correlación positiva entre conductividad eléctrica y el peso fresco, la longitud, y la absorción de fósforo, potasio, hierro, boro, zinc y molibdeno (Sublett y col., 2018). Sapkota y col. (2019) estudiaron cuatro concentraciones (mmol/l) diferentes de nutrientes de N, K y Ca en la solución nutritiva: T1 (10,71, 2,56, y 3,74), T2 (14,99, 6,01 y 4,99), T3 (17,85, 7,67 y 6,23) y T4 (21,42, 8,95 y 8,73), encontrando los mayores valores productivos cuando se usó la SN compuesta por N 17,85 mM, K 7,67 mM y Ca 6,24 mM. Tsouvaltzis y col. (2020) estudiaron como la reducción en la concentración de N de la solución nutritiva afecta al desarrollo productivo de la planta y a la concentración final de N en hoja. Pusieron un control con 9,35 mmol/l de N, que compararon con plantas a las que se les aplicó una reducción del N en un 50%, es decir, 4,68 mmol/l. Con este estudio concluyeron que la reducción del N en un 50% en la SN no provocó la reducción del contenido foliar de N, K, P, Ca, Mg y Mn, gracias a un suplemento de aminoácidos que se realizó en este tratamiento; no observaron tampoco cambios en la concentración de antocianos.

Otra línea interesante que se estudia frecuentemente es la relación entre nitrato y amonio en la solución nutritiva. Rocha y col. (2020) han realizado estudios recientemente en este sentido, proponiendo cuatro relaciones de amonio/nitrato: 0/14, 4/5, 7/7 y 11/2 mmol/l respectivamente, encontrando que las mayores producciones se dan únicamente cuando el porcentaje de nitrato es superior al de amonio, mientras que el contenido de nitratos en las hojas disminuyó significativamente al reducir la proporción de estos respecto al amonio.

En esta tesis, los ensayos llevados a cabo se centraron en conocer como diversas variables que afectan a la gestión de los sistemas hidropónicos modifican la producción y calidad de lechuga en invernadero. Así, se estudió i) la optimización de la solución nutritiva en un sistema flotante, ii) el manejo de dos tipos de sistema de cultivo como son el sistema flotante y el sistema flujo-reflujo, y, iii) la densidad de plantación de un cultivo hidropónico vertical.

Como se ha comentado, en esta tesis se estudian varios aspectos específicos del cultivo hidropónico de lechuga en unas instalaciones y en unas condiciones particulares, con el deseo de ser una pequeña contribución al esfuerzo investigador que se lleva realizando en las últimas décadas.

1.3. Referencias bibliográficas

- Adrover, M., Moyà, G., y Vadell, J. (2013). Use of hydroponics culture to assess nutrient supply by treated wastewater. *Journal of Environmental Management*, 127, 162–165.
- Alvarado-camarillo, D., Valdez-aguilar, L. A., Antonio, J., Rascón-alvarado, E., Peña-ramos, F. M., Valdez-aguilar, L. A., y Antonio, J. (2020). Response of hydroponic lettuce to aeration, nitrate and potassium in the nutrient solution. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B. Soil & Plant Science*, 0(0), 1–8.
- Amiri, M., y Sattary, N. (2004). Mineral precipitation in solution culture. *Acta Horticulturae*, 644, 469–471.
- Avgoustaki, D. D., y Xydis, G. (2020). Indoor vertical farming in the Urban nexus context: Business growth and resource savings. *Sustainability (Switzerland)*, 12(5), 1–18.
- Baixauli, C., y Aguilar, J. (2002). Cultivo sin suelo de hortalizas: aspectos prácticos y experiencias. Ed: Generalitat Valenciana.
- Barbosa, G. L., Almeida Gadelha, F. D., Kublik, N., Proctor, A., Reichelm, L., Weissinger, E., Wohlleb, G. M., y Halden, R. U. (2015). Comparison of land, water, and energy requirements of lettuce grown using hydroponic vs. Conventional agricultural methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(6), 6879–6891.
- Benton Jones, J. (1983). *A Guide for the Hydroponic and Soilless Culture Growers*. Timber Press. Portland, Oregon, 124 pags.
- Benton Jones, J. J. (2008). Hydroponics : Its history and use in plant nutrition studies. September 2012, 37–41.
- Benton Jones, J. (2014). Growing Plants Hydroponically. In *American Biology Teacher* (Vol. 47, Issue 6).
- Bilalis, D., Kanatas, P., Patsiali, S., Konstantas, A., y Akoumianakis, K. (2009). Comparison between conventional and organic floating systems for lettuce and tomato (*Lactuca sativa* and *Lycopersicon esculentum*) seedling production. *Journal of Food, Agriculture and Environment*, 7(2), 623–628.
- Boukema, I. W., Hazekamp, T., y van Hintum, T. J. (1990). The CGN lettuce collection. (p. 27).
- Carrasco, G., Martínez, A. C., Márquez, O., Osorio, D., Urrestarazu, M., y Salas, M. C. (2003). Vegetable seedlings grown in a float system. *Acta Horticulturae*, 614 (Figure 1), 241–245.
- Carrasco, G.; Sandoval, C. (2016). *Manual práctico del cultivo de la lechuga*. Ed.: Mundiprensa
- Chanu, W. T., Devi, K. S., Chakrapni, K., y Wangkhem, B. (2020). AgriCos e-Newsletter 0000. July, 2012–2013.
- Christie, C. B., y Nichols, M. A. (2004). Aeroponics - A production system and research tool. *Acta Horticulturae*, 648, 185–190.
- Cifuentes-Torres, L., Mendoza-Espinosa, L. G., Correa-Reyes, G., y Daesslé, L. W. (2021). Hydroponics with wastewater: a review of trends and opportunities. *Water and Environment Journal*, 35(1), 166–180.
- Cornillon, P. (1988). Influence of root temperature on tomato growth and nitrogen nutrition. In *Acta Horticulturae*.
- CREM (2021). Centro Regional de Estadística de Murcia. <https://econet.carm.es/> (acceso online 22 enero 2022).
- Damerum, A., Chapman, M. A., y Taylor, G. (2020). Innovative breeding technologies in lettuce for improved post-harvest quality. *Postharvest Biology and Technology*, 168(March), 111266.
- De Carvalho, R. O., Weymar, L. C. N., Zanovello, C. B., Da Luz, M. L. G. S., Gadotti, G. I., Da Luz, C. A. S., y Gomes, M. C. (2015). Hydroponic lettuce production and minimally processed lettuce. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 2015(May), 290–

- 293.
- De Vries, I. M. (1997). Origin and domestication of *Lactuca sativa* L. Genetic Resources and Crop Evolution, 44(2), 165–174.
- De Vries, I. M., y van Raamsdonk, L. W. D. (1994). Numerical morphological analysis of Lettuce cultivars and species (*Lactuca* sect. *Lactuca*, Asteraceae). Plant Systematics and Evolution, 193(1–4), 125–141.
- Despommier, D. (2011). The vertical farm: Controlled environment agriculture carried out in tall buildings would create greater food safety and security for large urban populations. Journal Fur Verbraucherschutz Und Lebensmittelsicherheit, 6(2), 233–236.
- Dunn, B. (2015). Hydroponics. Ed.: Oklahoma Cooperative Extension Service.
- DuPont, M. S., Mondin, Z., Williamson, G., y Price, K. R. (2000). Effect of variety, processing, and storage on the flavonoid glycoside content and composition of lettuce endive. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 48(9), 3957–3964.
- Eigenbrod, C., y Gruda, N. (2015). Urban vegetable for food security in cities. A review. Agronomy for Sustainable Development, 35(2), 483–498.
- FAO. (2006). Trade Negotiations and Gender. Ed.: FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura).
- FAOSTAT, 2022. Base de datos estadísticos corporativos de la Organización para la Agricultura y la Alimentación. <http://faostat3.fao.org/home/index.html> (acceso online 23 enero 2022).
- Farid, M. et al. (2020). Testing of lollo rossa lettuce varieties (*Lactuca sativa* var. *crispa*) on different ammonium-nitrate ratio in the hydroponic nutrient solution Testing of lollo rossa lettuce varieties (*Lactuca sativa* var. *crispa*) on different ammonium-nitrate ratio.
- Fernández, J. A., Navarro, A., Vicente, M. J., Peñapareja, D., y Plana, V. (2008). Effect of Seed Germination Methods on Seedling Emergence and Earliness of Purslane (*Portulaca oleracea* L.) Cultivars in a Hydroponic Floating System. 207–212.
- Ferreres, F., Gil, M. I., Castañer, M., y Tomás-Barberán, F. A. (1997). Phenolic Metabolites in Red Pigmented Lettuce (*Lactuca sativa*). Changes with Minimal Processing and Cold Storage. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 45(11), 4249–4254.
- Fontana, E., y Nicola, S. (2009). Traditional and soilless culture systems to produce corn salad (*Valerianella olitoria* L.) and rocket (*Eruca sativa* Mill.) with low nitrate content. Journal of Food, Agriculture and Environment, 7(2), 405–410.
- Fraile-Robayo, R. D., Álvarez-Herrera, J. G., Reyes M., A. J., Álvarez-Herrera, O. F., y Fraile-Robayo, A. L. (2017). Evaluación del crecimiento y calidad de lechuga (*Lactuca sativa* L.) en hidroponía con sistema cerrado de recirculación. Agronomía Colombiana, 35(2), 216–222.
- Frantz, J. M., Ritchie, G., Cometti, N. N., Robinson, J., y Bugbee, B. (2004). Exploring the limits of crop productivity: Beyond the limits of tipburn in lettuce. Journal of the American Society for Horticultural Science, 129(3), 331–338.
- Frasetya, B., Harisman, K., y Ramdaniah, N. A. H. (2021). The effect of hydroponics systems on the growth of lettuce. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1098(4), 042115.
- Funk, V. a., Bayer, R. J., Keeley, S., Chan, R., Watson, L., Gemeinholzer, B., Schilling, E. E., Panero, J. L., Baldwin, B. G., Garcia-Jacas, N., Susanna, A., y Jansen, R. K. (2005). Everywhere but Antarctica: Using a supertree to understand the diversity and distribution of the Compositae. In Kongelige Danske Videnskabernes Selskab, Biologiske Skrifter (Vol. 55).
- Gashgari, R., Alharbi, K., Mughribil, K., Jan, A., y Glolam, A. (2018). Comparison between growing plants in hydroponic system and soil based system. Proceedings of the World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering, 1–7.
- Gepts, P. (2014). Domestication of Plants. Encyclopedia of Agriculture and Food Systems, October, 474–486.
- Gericke, W.F. (1937). Hydroponics—crop production in liquid culture media. Science 85 (2198), 177178.
- Gislerød, H. R., y Kempton, R. J. (1983). The oxygen content of flowing nutrient solutions used for cucumber and tomato culture. Scientia Horticulturae, 20(1), 23–33.

- Godfray, H. C. J. (2018). Food security: The challenge of the present. *Geoforum*, 91(February), 73–77.
- Graamans, L., Baeza, E., van den Dobbelsteen, A., Tsafaras, I., Stanghellini, C., 2018. Plant factories versus greenhouses: comparison of resource use efficiency. *Agric. Syst.* 160, 31e43.
- greenhouses: comparison of resource use efficiency. *Agric. Syst.* 160, 31e43.
- Graves, C. J., y Hurd, R. G. (1983). Intermittent Solution Circulation in the Nutrient Film Technique. In *Acta Horticulturae* (Issue 133, pp. 47–52).
- Gruda, N. (2005). Impact of environmental factors on product quality of greenhouse vegetables for fresh consumption. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 24(3), 227–247.
- Han, Y. F., Cao, G. X., Gao, X. J., y Xia, M. (2010). Isolation and characterisation of the sesquiterpene lactones from *Lactuca sativa* L var. anagustata. *Food Chemistry*, 120(4), 1083–1088.
- Harlan, J. R. (1986). Lettuce and the Sycomore: sex and romance in ancient Egypt. *Economic Botany*, 40(1), 4–15.
- Harlan, J.R. (1992). *Crops and Man*. Ed.: American Society of Agronomy and Crop Science Society of America, Madison.
- Helm, J. (1954). *Lactuca sativa* L. in morphologisch-systematischer Sicht. *Die Kulturpflanze*, 2(1), 72–129.
- Hewitt, E.J. (1966). Sand and wáter culture methods used in the study of plant nutrition. Technical communication N° 22 (revised). *Agricultural Bureaux*, Farnham Royal 1952: Tech. Comm. No. 22 of the Commonwealth Bureau of Horticulture and Plantation Crops, East Malling 1952. 1952 pp.x + 241 pp.
- Hoagland, D., Arnon, D., Hoagland, D. R., Arnon, D. I., y Hutchison, C. B. (1938). The water-culture method for growing plants without soil.
- Hoagland, D. R., y Arnon, D. I. (1950). Preparing the nutrient solution. *The Water-Culture Method for Growing Plants without Soil*, 347, 29–31.
- Hohl, U., Neubert, B., Pforte, H., Schonhof, I., y Böhm, H. (2001). Flavonoid concentrations in the inner leaves of head lettuce genotypes. *European Food Research and Technology*, 213(3), 205–211.
- Jan, S., Rashid, Z., Ahngar, T. A., Iqbal, S., Naikoo, M. A., Majeed, S., Bhat, T. A., Gul, R., y Nazir, I. (2021). *Hydroponics – A Review* Division of Agronomy. Ed.: Sher-e-Kashmir University of Agricultural Sciences and Technology Koul.
- Jesse, S. D., Zhang, Y., Margenot, A. J., y Davidson, P. C. (2019). Hydroponic Lettuce Production Using Treated Post-Hydrothermal Liquefaction Wastewater (PHW). 1–16.
- Jockel-Schneider, Y., Goßner, S. K., Petersen, N., Stölzel, P., Hägele, F., Schweiggert, R. M., Haubitz, I., Eigenthaler, M., Carle, R., y Schlagenhauf, U. (2016). Stimulation of the nitrate-nitrite-NO-metabolism by repeated lettuce juice consumption decreases gingival inflammation in periodontal recall patients: A randomized, double-blinded, placebo-controlled clinical trial. *Journal of Clinical Periodontology*, 43(7), 603–608.
- Kaiser, C., y Ernst, M. (2012). *Hydroponic Lettuce*. Univeristy of Kentucky Cooperative Sxtention Service, 1–4.
- Křístková, E., Doležalová, I., Lebeda, A., Vinter, V., y Novotná, A. (2008). Description of morphological characters of lettuce (*Lactuca sativa* L.) genetic resources. *Horticultural Science*, 35(3), 113–129.
- Larsen, J. E. (2008). Growers problems with hydroponics. February 2015, 37–41.
- Lee, S. K., y Kader, A. A. (2000). Preharvest and postharvest factors influencing vitamin C content of horticultural crops. *Postharvest Biology and Technology*, 20(3), 207–220.
- Lee, S., y Lee, J. (2015). Beneficial bacteria and fungi in hydroponic systems: Types and characteristics of hydroponic food production methods. *Scientia Horticulturae*, 195, 206–215.
- Lei, C., y Engeseth, N. J. (2021). Comparison of growth characteristics, functional qualities, and texture of hydroponically grown and soil-grown lettuce. *Lwt*, 150(May), 111931.
- Lindqvist, K. (1960). on the Origin of Cultivated Lettuce. *Hereditas*, 46(3–4), 319–350.
- Liu, J., Roland Leatherwood, W., & Mattson, N. S. (2012). Irrigation method and fertilizer

- concentration differentially alter growth of vegetable transplants. *HortTechnology*, 22(1), 56–63.
- Llorach, R., Martínez-Sánchez, A., Tomás-Barberán, F. A., Gil, M. I., y Ferreres, F. (2008). Characterisation of polyphenols and antioxidant properties of five lettuce varieties and escarole. *Food Chemistry*, 108(3), 1028–1038.
- Majid, M., Khan, J. N., Ahmad Shah, Q. M., Masoodi, K. Z., Afroza, B., y Parvaze, S. (2021). Evaluation of hydroponic systems for the cultivation of Lettuce (*Lactuca sativa* L., var. Longifolia) and comparison with protected soil-based cultivation. *Agricultural Water Management*, 245 (November 2019), 106572.
- Manzocco, L., Foschia, M., Tomasi, N., Maifreni, M., Dalla Costa, L., Marino, M., Cortella, G., y Cesco, S. (2011). Influence of hydroponic and soil cultivation on quality and shelf life of ready-to-eat lamb's lettuce (*Valerianella locusta* L. Laterr). *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(8), 1373–1380.
- MAPA (2021). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación y Medio Ambiente. <https://www.mapa.gob.es/es/> (acceso online 22 enero 2022).
- Maroto, J.V. (1998). Historia de la agronomía. Ed.: Mundi-Prensa.
- Maroto, J.V., Baixauli, C. (2016). Cultivos hortícolas al aire libre. Ed.: Cajamar Caja Rural.
- Marhuenda J.A. y García, J. (2016). Lechuga. Capítulo en Maroto, J.V. y Baixauli, C. 2016. Cultivos hortícolas al aire libre. Ed.: Cajamar Caja Rural.
- Martínez, E y García Lozano, M. (1993). Hortalizas en clima mediterráneo. Cultivos sin suelo. Compendios Horticultura 3. Ed.: Ediciones de Horticultura, S.L.
- Mattson, N., y Heinrich Lieth, J. (2019). Liquid culture hydroponic system operation. In *Soilless Culture: Theory and Practice Theory and Practice (Second Edi)*. Ed.: Elsevier B.V.
- Miller, C. T., Mattson, N. S., & Miller, W. B. (2011). Fertilizer composition, concentration, and irrigation method affect growth and development of oxalis regnellii and O. triangularis. *HortScience*, 46(8), 1110–1115.
- Molitor, H. D., y Fischer, M. (2001). Oxygen supply in the root zone of soilless culture systems for indoor landscaping. *Acta Horticulturae*, 554, 165–172.
- Moorby, J., y Graves, C. J. (1980). Root and Air Temperature Effects on Growth and Yield of Tomatoes and Lettuce. In *Acta Horticulturae* (Issue 98, pp. 29–44).
- Mou, B. (2008). Lettuce. In: Prohens J., Nuez F. (eds) *Vegetables I. Handbook of Plant Breeding*, vol 1.1. Ed.: Springer.
- Murphy, M. T., Zhang, F., Nakamura, Y. K., y Omaye, S. T. (2011). Comparison between Hydroponically and Conventionally and Organically Grown Lettuces for Taste, Odor, Visual Quality and Texture: A Pilot Study. *Food and Nutrition Sciences*, 02(02), 124–127.
- Nasaruddin, A., Amin, R., Nissa, S., y M.G., P. (2019). Growth and production of several Romaine lettuce varieties (*Lactuca sativa* var. Romana) on various ratios of ammonium-nitrate in hydroponic nutrition formulations.
- Nguyen, N. T., McInturf, S. A., y Mendoza-Cózatl, D. G. (2016). Hydroponics: A versatile system to study nutrient allocation and plant responses to nutrient availability and exposure to toxic elements. *Journal of Visualized Experiments*, 2016(113), 1–9.
- Nicola, S., y Fontana, E. (2007). Cultivation management on the farm influences postharvest quality and safety. *Acta Horticulturae*, 746, 273–280.
- Nicola, S., Hoeberechts, J., y Fontana, E. (2005). Comparison between traditional and soilless culture systems to Produce rocket (*Eruca sativa*) with Low Nitrate Content. *Acta Horticulturae*, 697(July), 549–555.
- Nicolle, C., Cardinault, N., Gueux, E., Jaffrelo, L., Rock, E., Mazur, A., Amouroux, P., y Rémésy, C. (2004). Health effect of vegetable-based diet: Lettuce consumption improves cholesterol metabolism and antioxidant status in the rat. *Clinical Nutrition*, 23(4), 605–614.
- Nielsen, C. J., Ferrin, D. M., y Stanghellini, M. E. (2006). Efficacy of biosurfactants in the management of *Phytophthora capsici* on pepper in recirculating hydroponic systems. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 28(3), 450–460.
- Okemwa, E. (2015). Effectiveness of Aquaponic and Hydroponic Gardening To Traditional Gardening. *International Journal of Scientific Research and Innovative Technology*, 2(12), 2313–3759.

- Olubanko, O. O., y Alade, A. E. (2018). Growth and Yield Response of Tomato Plants Grown Under Different Substrates Culture. *JoST*, 9(2), 110–122.
- Oost, E., (1980). Domesticatie en verdere ontwikkeling van sla, witlof en andijvie. 37 pp. Ingenieurs thesis, Wageningen Agricultural University.
- Öztekin, G. B., Uludag, T., y Tüzel, Y. (2018). Growing Spinach in a Floating System With Different Concentrations of Nutrient. 16(3), 3333–3350.
- Peet, M. M. (1999). Greenhouse crop stress management. In *Acta Horticulturae* (Vol. 481, pp. 643–654).
- Petropoulos, S. A., Chatzieustratiou, E., Constantopoulou, E., y Kapotis, G. (2016). Yield and quality of lettuce and rocket grown in floating culture system. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 44(2), 603–612.
- Pinto, J. R., Chandler, R. A., & Dumroese, R. K. (2008). Growth, nitrogen use efficiency, and leachate comparison of subirrigated and overhead irrigated pale purple coneflower seedlings. *HortScience*, 43(3), 897–901.
- Pinto, E., Almeida, A. A., Aguiar, A. A. R. M., y Ferreira, I. M. P. L. V. O. (2014). Changes in macrominerals, trace elements and pigments content during lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth: Influence of soil composition. *Food Chemistry*, 152, 603–611.
- Putra, P. A., y Yuliando, H. (2015). Soilless Culture System to Support Water Use Efficiency and Product Quality: A Review. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 3, 283–288.
- Resh, H. M. (2013). *A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener*. Ed.: CRC Press.
- Rocha, D. C., Franciele, B., & Tavares, D. S. (2020). Do nitrogen sources and molybdenum affect the nutritional quality and nitrate concentrations of hydroponic baby leaf lettuce ? 00, 1–8.
- Rodenburg, C.M. (1960). Varieties ofLettuce: an international mono- graph. Varieties discription nr. 3, IVT, 260 pp. Tjeenk Willink, Zwolle. Rulkens.
- Rodríguez-Hidalgo, S., Artés-Hernández, F., Gómez, P. A., Fernández, J. A., y Artés, F. (2010). Quality of fresh-cut baby spinach grown under a floating trays system as affected by nitrogen fertilisation and innovative packaging treatments. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90(6), 1089–1097.
- Rubatzky, V. E., y Yamaguchi, M. (1997). Lettuce and Other Composite Vegetables. *World Vegetables*, 333–370.
- Ryder, E. J. (1986). Lettuce breeding. In *Breeding vegetable crops* (pp. 436–472).
- Safaei, M., Panahandeh, J., Tabatabaei, S. J., y Motallebi Azar, A. R. (2015). Effects of different nutrients solutions on nutrients concentration and some qualitative traits of lettuce in hydroponics system. *Journal of Science and Technology of Greenhouse Culture*, 6(2), 1–8.
- Santos, C. B., y Ríos, M. D. (2016). *Cálculo de soluciones nutritivas*. Ed.: Servicio de Agricultura y Desarrollo Rural. Cabildo Insular de Tenerife.
- Sapkota, S., Sapkota, S., y Liu, Z. (2019). Effects of Nutrient Composition and Lettuce Cultivar on Crop Production in Hydroponic Culture. 5, 72.
- Sardare, M. (2013). a Review on Plant Without Soil - Hydroponics. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 02(03), 299–304.
- Savvas, D. (2003). Hydroponics: A modern technology supporting the application of integrated crop management in greenhouse. *Food, Agriculture y Environment*, 1(1), 80–86.
- Scuderi, D., Giuffrida, F., y Noto, G. (2009). Effects of nutrient solution EC on yield, quality and shelf-life of lettuce grown in floating system. *Acta Horticulturae*, 807, 221–226.
- Sharma, N., Acharya, S., Kumar, K., Singh, N., y Chaurasia, O. P. (2018). Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview. *Journal of Soil and Water Conservation*, 17(4), 364.
- Silva, J. V., y Giller, K. E. (2021). Grand challenges for the 21st century: what crop models can and can't (yet) do. *The Journal of Agricultural Science*, 1–12.
- Spehia, R. S., Devi, M., Singh, J., Sharma, S., Negi, A., Singh, S., Chauhan, N., Sharma, D., y Sharma, J. C. (2018). Lettuce growth and yield in Hoagland Solution with an organic concoction Lettuce growth and yield in Hoagland Solution with an. *International Journal of Vegetable Science*, 00(00), 1–10.
- Stace, C.A. (1980). *Plant Taxonomy and Biosystematics*. Edward Arnold Limited, London, 74-

- 83.
- Steiner, A. A. (1961). A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil*, 15(2), 134–154.
- Still, D. W. (2007). Lettuce. *Vegetables*, 5, 127–140.
- Stuart, D. (2011). “Nature” is Not Guilty: Foodborne Illness and the Industrial Bagged Salad. *Sociologia Ruralis*, 51(2), 158–174.
- Sublett, W. L., Barickman, T. C., y Sams, C. E. (2018). The effect of environment and nutrients on Hydroponic Lettuce yield, quality, and Phytonutrients. *Horticulturae*, 4(4).
- Sukprasert, P. (2018). Hydroponic vegetable cultivation development for extension at Luk Phra Dabos Agricultural Training and Development Center , Samut Prakan province. December 2016.
- Swain, A., Chatterjee, S., Viswanath, M., y Roy, A. (2021). Hydroponics in vegetable crops : A review. *Pharma Innovative Journal*, 10(6), 629–634.
- Tabaglio, V., Boselli, R., Fiorini, A., Ganimede, C., Beccari, P., Santelli, S., y Nervo, G. (2020). Reducing nitrate accumulation and fertilizer use in lettuce with modified intermittent Nutrient Film Technique (NFT) system. *Agronomy*, 10(8).
- Tambakhe, M. D., y Gulhane, V. S. (2020). Hydroponics System. A survey on techniques and technology used in hydroponics system. 5, 1, 233-248.
- Tomás-Barberán, F. A., Gil, M. I., Castañer, M., Artés, F., y Saltveit, M. E. (1997). Effect of Selected Browning Inhibitors on Phenolic Metabolism in Stem Tissue of Harvested Lettuce. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 45(3), 583–589.
- Tomasi, N., Pinton, R., Dalla Costa, L., Cortella, G., Terzano, R., Mimmo, T., Scampicchio, M., y Cesco, S. (2015). New “solutions” for floating cultivation system of ready-to-eat salad: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 46(Part B), 267–276.
- Tsouvaltzis, P., Kasampalis, D. S., y Aktsoğlu, D. (2020). Effect of Reduced Nitrogen and Supplemented Amino Acids Nutrient Solution on the Nutritional Quality of Baby Green and Red Lettuce Grown in a Floating System. *Agronomy*, 10, 922
- Treftz, C., y Omaye, S. T. (2016). Hydroponics: potential for augmenting sustainable food production in non-arable regions. *Nutrition and Food Science*, 46(5), 672–684.
- Ulises Durany, C. (1984). Hidroponía. Cultivo de plantas sin tierra. Biblioteca del Agricultor. 5ª ed. Ed.: Síntesis. S.A. Barcelona.
- Urrestarazu, M. (2004). Tratado de cultivo sin suelo. Edita: Ediciones Mundi-Prensa.
- Urrestarazu, M. (2015). Año: 2015 Autor: Urrestarazu, M. Edita: Ediciones Mundi-Prensa.
- Verdú, J.M., Cisneros, F.J.B. (2007). Hortalizas y Verduras en la Alimentación Mediterránea. Ed.: Universidad de Almería.
- Weaver, G. M., Iersel, M. W. Van, y Testezlaf, R. (2015). Subirrigation: Historical Overview, Challenges, and Future Prospects. *HortTechnology*, 25(3)
- Wei, T., van Treuren, R., Liu, X., Zhang, Z., Chen, J., Liu, Y., Dong, S., Sun, P., Yang, T., Lan, T., Wang, X., Xiong, Z., Liu, Y., Wei, J., Lu, H., Han, S., Chen, J. C., Ni, X., Wang, J., ... Liu, H. (2021). Whole-genome resequencing of 445 *Lactuca* accessions reveals the domestication history of cultivated lettuce. *Nature Genetics*, 53(5), 752–760.
- Winsor, G.W.; Schawarz, M. (1990). Soilless culture for horticultural crop production. Ed.: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. 188 pags.
- Yang, L., Yang, X., Zhao, H., Huang, D., & Tang, D. (2018). Ebb-and-flow subirrigation strategies increase biomass and nutrient contents and reduce nitrate levels in lettuce. *HortScience*, 53(7), 1056–1061.
- Zabel, F., Delzeit, R., Schneider, J. M., Seppelt, R., Mauser, W., y Václavík, T. (2019). Global impacts of future cropland expansion and intensification on agricultural markets and biodiversity. *Nature Communications*, 10(1), 1–10.
- Zapata-Vahos, I. C., Rojas-Rodas, F., David, D., Gutierrez-Monsalve, J. A., y Castro-Restrepo, D. (2020). Comparison of antioxidant contents of green and red leaf lettuce cultivated in hydroponic systems in greenhouses and conventional soil cultivation. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 73(1), 9077–9088.
- Zeroni, M., Gale, J., y Ben-Asher, J. (1983). Root aeration in a deep hydroponic system and its effect on growth and yield of tomato. *Scientia Horticulturae*, 19(3–4), 213–220.

Zheng, Y., Wang, L., y Dixon, M. (2007). An upper limit for elevated root zone dissolved oxygen concentration for tomato. *Scientia Horticulturae*, 113(2), 162–165.

Capítulo 2: Justificación y objetivos

2. Justificación y objetivos

En las próximas décadas habrá un aumento global en la demanda de alimentos debido al incremento de la población, mientras que la agricultura seguirá enfrentándose a una serie de problemas derivados de la disminución de la disponibilidad de tierra cultivable, contaminación medioambiental, escasez de agua, imprevisibilidad en los patrones meteorológicos, etc. Ante estos escenarios, la producción agrícola se encuentra frente al reto de diseñar, desarrollar y optimizar nuevos sistemas de cultivo más productivos y ecológicamente sostenibles, que complementen a la producción procedente de los sistemas de cultivo tradicional. Uno de estos nuevos sistemas de cultivo hace referencia a los cultivos hidropónicos de ciclo cerrado. En este sentido, el cultivo de lechuga (*Lactuca sativa* L.) es uno de los que mejor se adapta a la hidroponía. Bajo este sistema su producción está experimentando un gran auge en los últimos años debido a varios aspectos: favorecen el desarrollo de las plantas, mejoran la calidad del cultivo, suponen una mejora medioambiental y un ahorro económico, mejoran en la sanidad vegetal y permiten la puesta en marcha de canales cortos de distribución, venta y consumo del producto.

Los estudios científico-técnicos de los diferentes sistemas hidropónicos destinados a mejorar la productividad y la calidad de la cosecha en la menor superficie posible han aumentado exponencialmente en las últimas décadas, sobre todo, en el cultivo de lechuga. Aunque, como ya se ha apuntado en el capítulo anterior, la puesta a punto de esta técnica aplicada de forma comercial ha avanzado mucho en los últimos años, se puede considerar que está todavía en su fase juvenil y exige una amplia investigación sobre diversos aspectos tanto en el diseño de estos sistemas como en su manejo y gestión para diferentes condiciones ambientales. Queda aún mucho por estudiar debido a la amplia variedad de sistemas existentes y la gran cantidad de variables que están involucrados en dichos sistemas. Bajo este contexto, la presente tesis tiene como **objetivo general** optimizar el uso de los sistemas hidropónicos para conseguir la máxima producción y calidad de cosecha de los cultivos de lechuga bajo invernadero. Para la consecución de este objetivo se abordan los siguientes objetivos específicos:

- 1) Determinar la forma óptima de gestionar la concentración de la solución nutritiva en plantas de lechuga Lollo roso cultivadas en un sistema hidropónico flotante a raíz desnuda.
- 2) Definir la mejor forma de manejar los tiempos de riego en los sistemas hidropónicos flujo-reflujo y sistema flotante para el cultivo de lechuga bajo invernadero, determinando cuál es el mejor sistema de entre los dos propuestos según el rendimiento agronómico y calidad de la cosecha.
- 3) Determinar qué densidad de plantación es la óptima para un cultivo vertical de lechuga Butterhead bajo invernadero desde el punto de vista productivo y de calidad.

Capítulo 3:
**Experimento 1. Optimización del
manejo de la solución nutritiva para
el cultivo de lechuga Lollo rosso en un
sistema flotante**

3. Experimento 1. Optimización del manejo de la solución nutritiva para el cultivo de lechuga Lollo rosso en un sistema flotante

3.1. Introducción

La eficiencia de los sistemas hidropónicos a raíz desnuda en solución nutritiva depende de muchos factores durante el cultivo como las condiciones ambientales, composición química de la solución nutritiva, variedad de cultivo, gestión de plagas y enfermedades, o el tratamiento postcosecha (Fallovio et al., 2009; Kader, 2008; Spehia et al., 2018). Entre estos, la composición de nutrientes de la SN es un aspecto crucial para el éxito de la producción de lechuga y de esto depende, en gran medida, su rendimiento productivo y la calidad del producto final. En este sentido, se realizó un ensayo con el objetivo de determinar la mejor forma de gestionar la composición química de la solución nutritiva en plantas de lechuga Lollo rosso cultivadas en un sistema hidropónico flotante a raíz desnuda. Para este experimento se diseñaron tres manejos diferentes que variaban en la concentración de nutrientes de la SN durante el desarrollo del cultivo. Estos tratamientos consistieron en: i) usar una SN Hoagland (D. R. Hoagland y Arnon, 1950) modificada durante todo el ciclo de cultivo (“100% H”); ii) usar la SN Hoagland al 100 % al inicio del cultivo y cambiarla 21 días después del trasplante por una SN Hoagland diluida al 50% (“100 a 50% H”), y, iii) usar la SN Hoagland diluida al 50% (“50% H”) durante todo el cultivo. Durante el desarrollo del cultivo se evaluaron parámetros productivos y de calidad para seleccionar de estos tres manejos el más idóneo en cuanto al rendimiento y la calidad de las lechugas.

3.2. Material y métodos

3.2.1. Material vegetal

Para el desarrollo de este ensayo se escogió el cultivar Lollo rosso (var. E01.30190). Las semillas fueron suministradas por la casa de semillas Enza Zaden (Cartagena). Este tipo de lechuga es muy apreciada por el consumidor por su color rojo y sabor ligeramente amargo, lo que hace que sea una lechuga muy consumida en ensaladas elaboradas junto a brotes de otros cultivos y otras hortalizas de hoja.

3.2.2. Descripción de las instalaciones

Invernadero

El experimento se realizó en uno de los módulos del invernadero que el departamento de Nutrición Vegetal del Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC) dispone en su finca experimental “Tres caminos” en Santomera (Región de Murcia, España) (30672232 m E, 4219590 m N, 123 msnm).

El módulo tiene una superficie de 462,5 m² (18,5 x 25,0 m) y orientación norte-sur. La construcción está realizada sobre una estructura de acero galvanizado con una cubierta de

materiales plásticos con techo a dos aguas. Las paredes norte y sur del invernadero están cubiertas de policarbonato (PC; transmisión PAR 65 %), cubriendo además aproximadamente un tercio del techo. La parte central del techo del invernadero (dos tercios del total del techo) está cubierta con película de etilvinilacetato (EVA; transmisión PAR 80 %). El módulo tiene una altura de 5,0 m y 7,5 m a la canal y cumbrera, respectivamente. La separación entre módulos se efectúa mediante pared interior de policarbonato.

El módulo dispone de los siguientes dispositivos para el control climático:

- Sensores de toma de datos de variables climáticas:
 - Sensores de temperatura.
 - Sensores de humedad relativa.
 - Sensores de radiación.
- Dispositivos para el manejo del clima.
 - Sistema motorizado de ventilación cenital de dos ventanas de un cuarto de arco mariposa.
 - Pantalla de sombreado (modelo IC50) con tracción mecánica automática de apertura y cierre. Dan un 48 % de sombreado que conlleva un 55 % de ahorro energético. En los canalones del techo se usa pantalla transparente, dando un 22 % de sombreado y 43 % de ahorro energético.
 - Sistema de refrigeración. Para la refrigeración del invernadero se cuenta con un sistema AirCooling provisto de los siguientes elementos:
 - Módulo de humectación.
 - Cuatro extractores tipo axial (helicoidal), con persiana de apertura-cierre automático por sistema mecánico (centrifugo de empuje). Los extractores tienen una capacidad de extracción de 38.000 m³/h. También cuenta con malla anti insectos.
 - Dos recirculadores de aire interiores.
 - Sistema de humidificación AIR-FOG para el control de la humedad interior y aplicación de fitosanitarios y desinfectantes. Las conducciones de aire y agua son de PE-63 con una densidad de boquillas 1 ud/18 m² con caudal de aire 0,83 m³/h y caudal de agua 5,94 l/h. Tiene un grupo de presión JH 15 5M de 25 L (1CV) con acumulador de 250 litros. Un compresor de aire de 4 CV con calderín de 50 l AIRFOG 2,50-4,12 de 5,5 CV.

Cámara de germinación

La obtención de plántulas para el desarrollo del experimento se realizó en una cámara de germinación situada en la finca experimental anteriormente citada. La cámara consta de un habitáculo de 4 m² con paredes y techo de paneles tipo sándwich con dos paneles de acero

galvanizado. Para garantizar el aislamiento de la cámara, el espacio existente entre los paneles de acero está relleno de espuma de poliuretano. El suelo está hecho a base de hormigón armado y recubierto de losa impermeable. Dentro de la cámara se ubican unas lejas donde se depositaban las bandejas en la que las semillas germinaron. La cámara de germinación dispone de los siguientes dispositivos para el control climático:

- Sensores de toma de datos de variables climáticas:
 - Sensor de temperatura.
 - Sensor de humedad relativa.
- Dispositivos para el manejo del clima:
 - Sistema de extracción de aire para control de la humedad
 - Sistema de refrigeración.
 - Sistema de calefacción.

Cabezal de riego

Para la preparación de la SN que se contó con un cabezal de riego totalmente equipado tal y como se puede observar en la figura 3.1. La SN se preparaba en una cuba madre de 2.000 l de capacidad. Esta cuba se llenaba de agua desionizada proveniente de una desalinizadora (modelo HRO-20-P, HIDROTEC, Cartagena) de 12 m³ de capacidad de producción diaria. Los fertilizantes se incorporaban desde los depósitos de abono concentrado que tenían una capacidad de 500 l cada uno. Se contó con los siguientes fertilizantes:

- Depósito 1. Nitrato potásico (0,54 M).
- Depósito 2. Nitrato cálcico (0,11 M).
- Depósito 3. Fosfato monopotásico (0,18 M).
- Depósito 4. Sulfato de magnesio (0,17 M).
- Depósito 5. Micronutrientes: H₃BO₃ (25 µM), MnSO₄·H₂O (2 µM), ZnSO₄·7H₂O (2 µM), CuSO₄·5H₂O (0,5 µM), (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O (0.5 µM) y Fe-EDTA.

Mediante la adición de un determinado volumen de cada uno de los abonos concentrados se conseguía una SN con la concentración deseada. Una vez fabricada la SN en la cuba de 2.000 l, se dirigía a las cubas de riego de 900 l de capacidad que estaban conectadas con los depósitos de las instalaciones de cultivo hidropónico situadas en el invernadero.

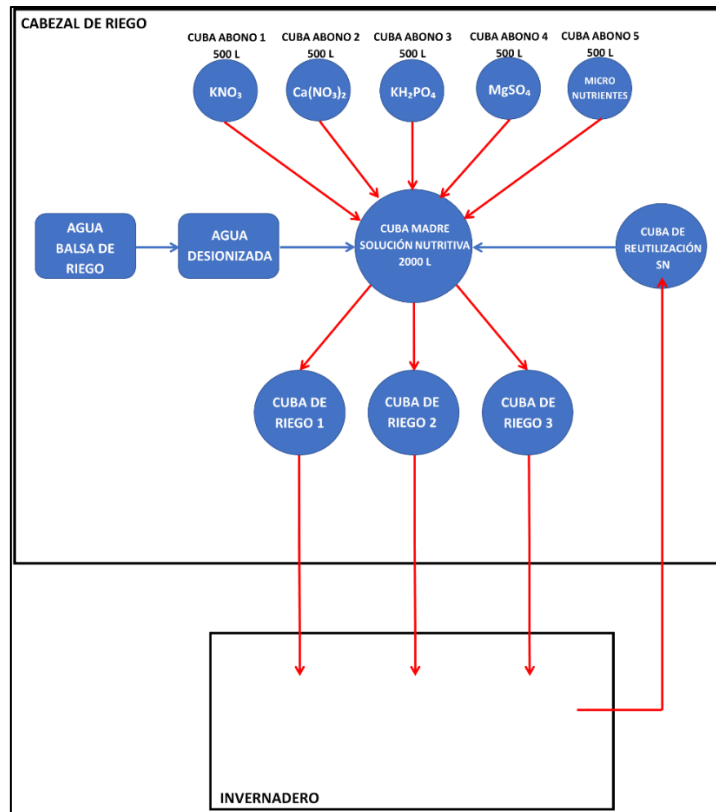


Figura 3.1. Esquema del cabezal de riego utilizado.

Sistema de cultivo empleado: mesas de cultivo hidropónico

El ensayo fue llevado a cabo en mesas de cultivo hidropónico (ver Imagen 3.1). Este sistema se basa en cultivar las plantas a raíz desnuda, es decir, que se prescinde totalmente de la tierra o de cualquier tipo de sustrato, encontrándose las raíces de las plantas en contacto directo con la SN, que les proporciona el agua, los nutrientes y el oxígeno necesarios para su desarrollo.

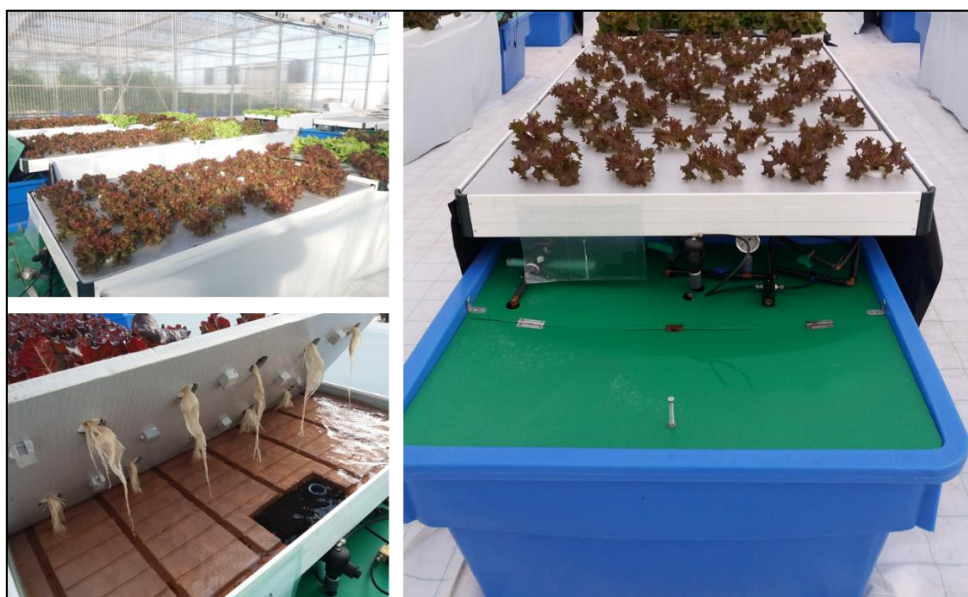


Imagen 3.1. Cultivo hidropónico a raíz desnuda de lechuga Lollo rosso en mesas.

Cada unidad de cultivo del sistema denominado “mesas de cultivo hidropónico” está compuesto por:

- Mesa de cultivo.
- Depósito para SN.
- Sistema de riego y drenaje.
- Sistema de recirculación de bomba.
- Sistema de entrada de SN a depósito desde cabezal de riego.
- Sistema de salida de SN sobrante a cabezal de riego.

Las mesas de cultivo eran de la marca “Stal and Plast A/S”, tenían unas dimensiones de 205,0 x 122,0 x 4,5 cm (largo, ancho y profundidad respectivamente), con una bandeja de capacidad efectiva para albergar 60 litros de SN. Cada mesa de cultivo dispuso de su propio depósito fabricado en Polietileno de 500 litros de capacidad para albergar la SN. Además, el depósito posee una tapa que impide que la suciedad o restos de cultivo entraran en contacto con la SN. El depósito tiene instalado dos sensores de nivel de SN, que informaron cuando al depósito le quedan 75 litros o cuando alcanza los 425 al llenarse. El software HIDROLEAF permite programar el llenado de estos depósitos desde el cabezal: cuando se activa el sensor de nivel de 75 l, automáticamente se procede al llenado del depósito hasta que se activa el sensor de 425 l.

La instalación de riego estuvo compuesta por una serie de tuberías que comunicaban el depósito con la mesa. En el depósito se coloca una bomba sumergible (marca SICCE modelo MULTI 5800 l/h). La salida de la bomba se bifurca en cuatro direcciones:

- Salida de riego a la mesa en su parte posterior.
- Salida de riego directa a la mesa en su parte anterior.
- Salida al cabezal para recuperación de la SN sobrante al acabar el cultivo.
- Salida al propio depósito con doble finalidad: recirculación-aireación y sistema de protección de la bomba en caso de obstrucción del resto de salidas.

Sistema de riego empleado: sistema flotante

El sistema flotante (ver Imagen 3.2) utilizado en las mesas de cultivo hidropónico consistió en mantener las raíces de las plantas inmersas en todo momento en la SN. Para una correcta oxigenación y mantenimiento de unos adecuados niveles de fertilizante, la SN es periódicamente incorporada a la zona radicular. El aumento de volumen que supone esta incorporación provoca una subida del nivel de SN en la mesa que es descargada de vuelta al tanque mediante un desagüe rebosadero.



Imagen 3.2. Sistema Flotante. Dentro del círculo rojo se observa el rebosadero que permite mantener siempre ajustado el nivel de SN en la mesa de cultivo.

Según el sistema de riego empleado, existían tres tipos de desagüe de SN desde la mesa al depósito:

1. Desagüe directo de la mesa al depósito. Consistía en un orificio practicado en la bandeja al que se le acopla un trozo de manguera y que por gravedad hace caer la SN en el depósito formando una cascada.
2. Salida directa a través de la tubería de entrada de la bomba a la mesa. Cuando la bomba no está funcionando, esta tubería de entrada sirve de desagüe al caer la SN por gravedad hacia el depósito.
3. Válvula de aire comprimido, programada para que se abriera cuando se quería vaciar la mesa de forma rápida en el sistema de riego flujo-reflujo.

La aireación de la SN en las mesas se lleva a cabo mediante tres métodos, todos ellos del propio sistema de riego-drenaje de la instalación. Fueron los siguientes:

1. Recirculación de la bomba. En la tubería de salida de la bomba existe una bifurcación para la recirculación que actúa, además de como medida de seguridad antes obstrucciones de la tubería, como oxigenador de la SN. Parte de la SN que sale por la bomba retorna al depósito a presión, provocando un burbujeo en la superficie de la SN del depósito. La altura de caída es variable en función del nivel de SN en el depósito: 10-40 cm.
2. Sistemas de desagüe de mesa a depósito.
 - a. Cascada por desborde del rebosadero de la bandeja de la mesa. Tiene una caída de 40-80 cm, en función del nivel de SN en el depósito.
 - b. Cascada desde válvula de aire comprimido. Tiene una caída de 40-80 m, en función del nivel de SN del depósito. Solo se utiliza en el sistema de riego flujo-reflujo.

3. Entrada a mesa. La SN, en su entrada a la mesa choca con la superficie de SN que ya hay en la bandeja de la mesa, provocando la aireación de la misma.

Estos mecanismos de aireación aseguraron niveles de oxígeno disuelto en torno a los 8 mg/l.

3.2.3. Software para el manejo del cultivo

Se dispuso del software HIDROLEAF, creado específicamente en el marco del proyecto Europeo Life del mismo nombre, con el que, a través de su acceso vía web, se gestiona y programa los siguientes procesos:

- Preparación de la SN en el cabezal de riego.
- Distribución de la SN desde el cabezal de riego hasta los diferentes depósitos existentes en el invernadero.
- Programación de riego de mesas de cultivo y de estructuras verticales.
- Control climático en cámara de germinación.
- Control climático en invernadero.

Además, el software dispuso de la posibilidad de lanzar alarmas cuando por cualquier razón el riego programado era interrumpido, así como cuando las cubas estaban a punto de quedarse sin SN. Las alarmas fueron lanzadas vía SMS al móvil de un usuario previamente definido. Este tipo de sistemas facilitó el trabajo y propició la rápida resolución de problemas.

3.2.4. Operaciones de cultivo.

Germinación.

Todas las plantas utilizadas en los diferentes experimentos se obtuvieron a través de la germinación de semillas en la cámara de germinación que el departamento de Nutrición Vegetal posee en la finca experimental del CEBAS-CSIC tal y como se puede observar en la Imagen 3.3. La germinación se realizó con una temperatura media de 18 °C y humedad relativa media de 80 % en condiciones de oscuridad. El tiempo de germinación varió de las 24 a las 36 h en función del cultivar. Como medio para la germinación de cada semilla se utilizó un cilindro de lana de roca (diámetro x altura = 2 x 3 cm), insertado en bandejas de poliestireno (largo x ancho = 60 x 40 cm) con capacidad de 240 cilindros por bandeja.

Previamente a colocar las bandejas en la cámara de germinación, los cilindros de lana de roca se mojan completamente en una SN Hoagland al 50 %. La concentración media de fertilizantes de la SN fue la siguiente: KNO₃ (1.50 mM), Ca(NO₃)₂ (1,00 mM), MgSO₄ (0.25 mM), KH₂PO₄ (0.25 mM), Fe-EDTA (10 µM), H₃BO₃ (10 µM), MnSO₄·H₂O (1 µM), ZnSO₄·7H₂O (2 µM), CuSO₄·5H₂O (0.5 µM), y (NH₄)₆Mo₇O₂₄·4H₂O (0.5 µM). El pH y la CE fueron de 5,5 y 1,4 dS/m respectivamente.



Imagen 3.3. Germinación de semillas de Lollo rosso.

Desarrollo de plántulas y crecimiento de las raíces.

Una vez germinadas las semillas, se desarrollaron las plántulas favoreciendo el crecimiento de las raíces, de manera que estas adquirieran una longitud suficiente para que los sistemas de cultivo hidropónico utilizados fueran funcionales (alrededor de 8 cm según ensayos preliminares). Para ello, las bandejas de poliestireno se trasladaron al invernadero y se colocaron en mesas de cultivo hidropónico (ver Imagen 3.4). Durante este periodo, las plántulas se regaron con una SN Hoagland al 100 %, asegurando la renovación total de la SN contenida en la mesa cada 30 minutos.

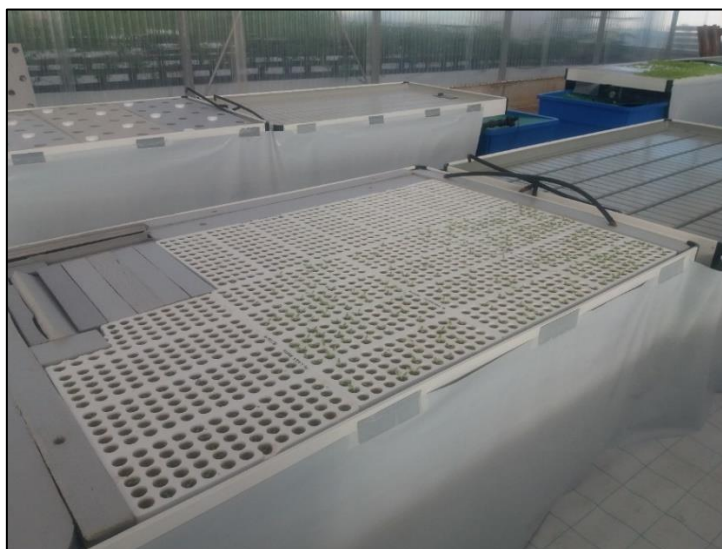


Imagen 3.4. Desarrollo de plántulas y crecimiento de raíces en bandejas de poliestireno.

Trasplante definitivo a sistemas de cultivo hidropónico.

Para el trasplante se usaron tapones de poliestireno expandido con un orificio central, fabricados expresamente para este sistema de cultivo. El tapón consta de dos piezas pegadas con pegamento termofusible. Los tacos de lana de roca donde las plantas crecían se sacaron de las

bandejas de germinación y se insertaron en el tapón de poliestireno expandido. En el caso de experimentos en mesas de cultivo, cada tapón con su taco de lana de roca y su respectiva planta se colocaron sobre bandejas de poliestireno extruido (marca Chovafoam T-III) hechas a medida (largo 120 cm, ancho 50 cm, grosor 3 cm) para que encajen en las mesas, donde quedaban flotando sobre la SN de la mesa. En cada mesa se colocaron cuatro de estas bandejas, cubriendo toda la superficie de la mesa. En el caso de los experimentos que se realizaron en las estructuras verticales y pirámides, los tapones se colocaron en los agujeros que tenían la tapa de las canales.

Solución nutritiva y su manejo durante el ensayo.

Estos tratamientos consistieron en: i) usar una SN Hoagland (D. R. Hoagland y Arnon, 1950) modificada durante todo el ciclo de cultivo (“100% H”); ii) usar la SN Hoagland al 100 % al inicio del cultivo y cambiarla 21 días después del trasplante por una SN Hoagland diluida al 50 % (“100 a 50% H”), y, iii) usar la SN Hoagland diluida al 50 % (“50% H”) durante todo el cultivo. Durante el desarrollo del cultivo se evaluaron parámetros productivos y de calidad para seleccionar de estos tres manejos el más idóneo. La concentración de la SN 100 % fue la propuesta por Hoagland (D. Hoagland et al., 1938). Durante el experimento se procedió a diluir esta SN cuando era necesario, pero solo en lo referente a los macronutrientes y dejando siempre los micronutrientes al 100 %.

La preparación de la SN se realizó con agua desionizada, procedente de una desalinizadora (modelo HRO-20-P, HIDROTEC, Cartagena) instalada en el propio cabezal de riego. Los fertilizantes para la preparación de los depósitos de abono concentrado se pesaron en una balanza con precisión $\pm 2,0$ g (RADWAG WPT 120/C2/R/NV, Varsovia, Polonia) y los micronutrientes se pesaron en una balanza (RADWAG WLC 2/A2, Varsovia, Polonia) con una precisión de $\pm 0,01$ g.

La concentración de SN de “100% H” se recoge en la tabla 3.1 (macronutrientes) y 3.2 (micronutrientes):

Tabla 3.1. Concentración de sales y macronutrientes utilizadas para la preparación de la SN.

COMPUESTO	SOLUCIÓN MADRE				SOLUCIÓN DE TRABAJO		
	PM	Concentración		Dis. final	Elemento	Concentración final	
	g/mol	M	g/l	mg/l		mM	ppm
KNO₃	101,10	1,00	101,10	6,00	N	14	195
Ca(NO₃)₂·4H₂O	236,16	1,00	236,16	4,00	P	7	273
KH₂PO₄	136,09	1,00	136,09	1,00	Ca	4	160
MgSO₄·7H₂O	246,49	1,00	246,49	1,00	P	1	31
					S	1	32
					Mg	1	24

Tabla 3.2. Concentración de sales y micronutrientes utilizadas para la preparación de la SN.

COMPUESTO	SOLUCIÓN MADRE		SOLUCIÓN DE TRABAJO				
	PM	Concentración		Dis. final	Elemento	Concentración final	
	g/mol	M	g/l	mg/l		mM	ppm
H3BO3	61,84	25,00	1,546	1,00	B	25,00	0,27
MnSO4·H2O	169,01	2,00	0,338	1,00	Mn	2,00	0,11
ZnSO4·7H2O	287,71	2,00	0,575	1,00	Zn	2,00	0,13
CuSO4·5H2O	249,71	0,50	0,125	1,00	Cu	0,50	0,03
(NH4)6Mo7O24·4H2O	1235,86	0,50	0,620	1,00	Mo	0,50	0,05
Fe-EDTA			18,60	1,00	Fe	20,00	1,12

Durante el desarrollo del experimento, tres veces a la semana se tomaron valores en los depósitos de la SN de temperatura (°C), pH, conductividad eléctrica (dS/m) y oxígeno disuelto (mg/l). Todas las medidas fueron tomadas con multimedidor digital (HACH HQ40D digital de dos canales, Colorado, EEUU). Si el pH no era el óptimo (entre 5-6) se ajustaba mediante la adición de ácido nítrico (1M) o hidróxido de sodio (1M). Además, en los experimentos que se realizaron en las mesas de cultivo, se tomaron medidas de temperatura de forma continua, mediante un sensor instalado en cada uno de los depósitos. Semanalmente se procedió a la desinfección de la SN de los depósitos de riego mediante la adición de 100 ml de ácido hipocloroso. En la Imagen 3.5 se puede observar cómo se realizó una de las mediciones de pH y CE de la SN.



Imagen 3.5. Medición de parámetros de la SN de las cubas de riego.

Durante el desarrollo de los experimentos, para proceder al reequilibrio nutricional de la SN, semanalmente se tomó una muestra de 100 ml de SN de cada uno de los depósitos. Esta muestra se analizó por el Servicio de Ionómica del CEBAS-CSIS. Con los resultados obtenidos de aniones y cationes, se identificaron y corrigieron las deficiencias existentes respecto a la composición original de la SN.

3.2.5. Diseño experimental.

Para la realización de este experimento 1 se escogió el cultivar Lollo rosso (var. E01.30190) y se utilizaron tres mesas de cultivo hidropónico, una mesa por tratamiento propuesto. En cada mesa se trasplantaron 40 lechugas con el montante total del experimento de 120 lechugas. La densidad inicial de plantación fue de 16 lechuga/m². Se pusieron en marcha tres tratamientos que diferían en la concentración de SN, tal y como se puede observar en la Tabla 3.3:

Tabla 3.3. Tratamientos propuestos.

TRATAMIENTO	MESA	SN
1	1	50% H
2	2	100 a 50% H
3	3	100% H

El diseño experimental en el invernadero fue como se indica en la **Figura 3.2**:

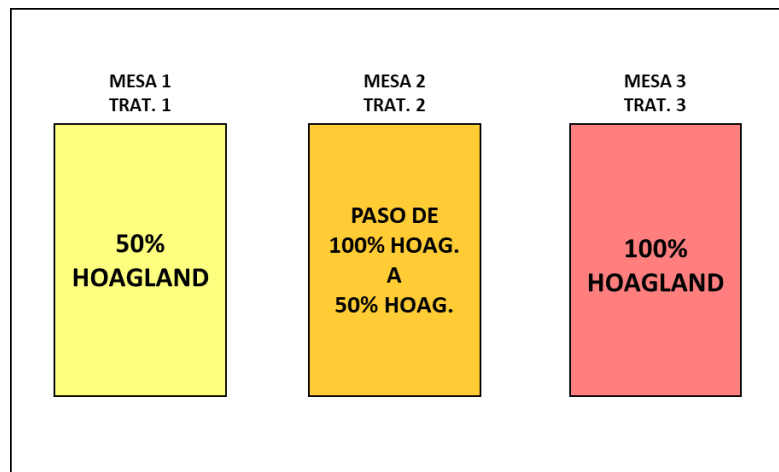


Figura 3.2. Diseño experimental.

El diseño experimental mostrado anteriormente en la Figura 3.2 quedó en el invernadero tal y como se muestra en la Imagen 3.6:

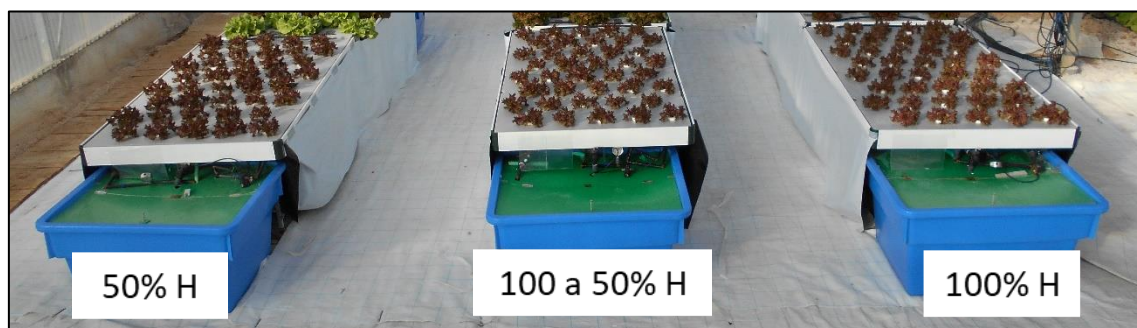


Imagen 3.6. Diseño experimental en invernadero.

A los 21 días (21 DDT) de haber realizado el trasplante se procedió a cambiar en el tratamiento 2 la concentración de la SN, de manera que se quitó la SN Hoagland al 100 % que contenía tanto la bandeja de la mesa de cultivo como el depósito de riego y se puso la SN Hoagland al 50 %. Este cambio se fue realizando de manera gradual, de forma que, en ningún momento, las raíces de las plantas quedaron en contacto con el aire.

A los 27 días (27 DDT) de haber hecho el trasplante en las mesas de cultivo se realizó una primera cosecha de quince lechugas, a razón de cinco lechugas por tratamiento. Se reagruparon las lechugas para seguir manteniendo la densidad de 16 plantas/m². Se determinó peso fresco (g) de parte aérea, peso fresco (g) de raíz, longitud de tallo y una parte de las hojas y la totalidad de la raíz fueron secados para su posterior análisis mineral.

A los 34 días (34 DDT) después de haber puesto en marcha los tratamientos se procedió a realizar una segunda cosecha en la que se realizaron las medidas de las siguientes determinaciones: peso fresco (g) de parte aérea, peso fresco (g) de raíz, color, y longitud de tallo (cm). Además, se tomaron muestras para el análisis mineral y para medir los antocianos y pigmentos fotosintéticos en laboratorio. Antes de la realización de la cosecha final, se procedió a la medición de clorofilas (unidades SPAD). También se midieron los parámetros de color, en hojas completamente expandidas y sin síntomas de clorosis.

Durante el desarrollo del experimento, las ventanas del techo se mantuvieron siempre cerradas. El sistema de refrigeración consistió en un sistema de evaporación de agua “air-cooling” y un sistema de extracción activa de aire compuesto por cuatro ventiladores-extractores de tipo axial helicoidal (38.000 m³/h por extractor). El punto de ajuste de la temperatura interna para la activación de los extractores fue de 20 °C. Mientras el sistema de ventiladores-extractores estaban encendidos, los dos ventiladores-removedores ubicados en el techo removían el aire interno del invernadero contribuyendo a la homogeneidad de temperaturas dentro del módulo.

La temperatura media diurna y nocturna fue respectivamente de 21 y 14 °C, medidas con un transmisor de temperatura fijo "DPF160".

Durante la realización, y tal y como se explica en el apartado 3.2.4. *Operaciones de cultivo* de la presente memoria, se procedió a la determinación de los parámetros pH, conductividad eléctrica, Tª y oxígeno disuelto de la SN; y semanalmente se desinfectó la SN y se procedió al reequilibrio nutricional de la misma.

3.2.6. Determinaciones.

Determinaciones de parámetros de producción.

Peso fresco

El parámetro peso fresco (g/planta) se midió en los dos muestreos realizados (27 y 34 DDT) a 10 lechugas por tratamiento tal y como se puede observar en la Imagen 3.7, tanto para la parte aérea como para la raíz. Para su determinación se usó una balanza de precisión (RADWAG WLC 2/A2, Varsovia, Polonia) con una precisión de $\pm 0,01$ g. La parte aérea y raíz de cada lechuga fueron separadas mediante un corte limpio a ras del taco de lana de roca. Las raíces, previamente a ser pesadas, se secaron con papel absorbente. Parte aérea y raíz, se depositaron por separado en un cuenco limpio y tarado y se procedió a anotar el peso fresco (g). Los resultados se expresan en gramos de peso fresco por planta (parte aérea o raíz) y son la media $\pm$ el ES de todas las lechugas cosechadas en el muestreo. En 8 y 16 DDT se tomaron medidas de 5 lechugas para controlar la evolución del PF durante el cultivo.

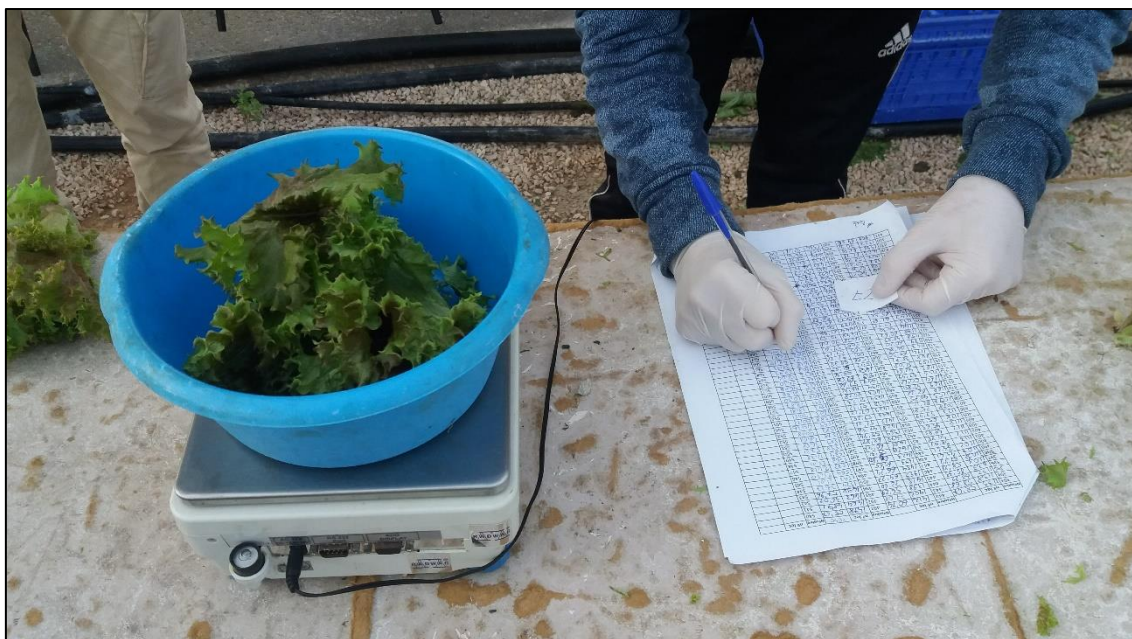


Imagen 3.7. Medición de peso fresco durante el muestreo.

Rendimiento productivo

El rendimiento productivo por unidad de superficie (g/m^2) se calculó para los dos muestreos realizados (27 y 34 DDT) a partir de los pesos frescos de parte aérea. La parte aérea de las lechugas fueron cosechadas al llegar al peso comercial en cada uno de los cultivares. Se midió la producción total de lechuga en cada uno de las mesas. La producción (g/m^2) se calculó como el cociente del peso fresco total de parte aérea de las lechugas por superficie de cultivo.

Contenido en materia seca

El contenido en materia seca por planta (g ms/planta) se midió en los dos muestreos realizados (27 y 34 DDT) en 10 lechugas por tratamiento, tanto para la parte aérea como para la raíz. Tras la recolección y la determinación del peso fresco, se procedió a la preparación de las lechugas para la posterior determinación del peso seco (g). A la parte aérea de la lechuga se le practicó un corte longitudinal obteniendo dos mitades, a una de las cuales se le practicó otro corte longitudinal tomando un cuarto de lechuga que constituían una muestra representativa de la lechuga con presencia de hojas de todas las edades. Uno de esos cuartos fue pesado en una balanza de precisión (RADWAG WLC 2/A2, Varsovia, Polonia) con una precisión de $\pm 0,01$ g y se introdujo en un sobre de papel-cartón etiquetado para la identificación del tratamiento y la repetición. En raíces, tras la determinación del peso fresco, se tomó como muestra toda la raíz.

Las muestras se introdujeron en una estufa de secado (MEMMERT modelo UF1060, Schwabach, Alemania) a 70 °C durante 72 horas con el fin de asegurar la pérdida total del contenido en agua. Una vez que solo quedó materia seca en la muestra, se procedió a determinar el peso seco mediante su pesado en una balanza de precisión (RADWAG WLC 2/A2, Varsovia, Polonia) con una precisión de $\pm 0,01$ g. En este experimento se determinó el contenido en materia seca de parte aérea y raíz de la lechuga, mientras que, en experimentos de estructuras verticales, se optó por tomar el peso seco solamente de la parte aérea.

Contenido relativo de agua

El contenido relativo de agua (%) se calculó como la inversa del contenido relativo en materia seca (g ms/g mf) a partir de los datos obtenidos tras el proceso descrito en el apartado anterior. Se calculó para los dos muestreos realizados (27 y 34 DDT) a partir de 10 lechugas por tratamiento, tanto para la parte aérea como para la raíz.

Longitud de tallo

La longitud de tallo (cm) fue determinada mediante el corte longitudinal de la lechuga y su posterior medición con una regla. Se midió en los dos muestreos realizados (27 y 34 DDT) a 6 lechugas por tratamiento.

Evolución del crecimiento

Para la obtención de la curva de crecimiento de las lechugas (parte aérea y raíz) se realizó un control de pesos a lo largo de todo el experimento en 0, 8, 16, 27 y 34 DDT. 0 DDT fue el punto de partida en el que se pesaron 60 lechugas (parte aérea y raíz de lechugas que sobraron de las bandejas de germinación tras el trasplante definitivo en mesas), los datos de 8 y 16 DDT se obtuvieron mediante el pesaje de 5 lechugas y los de 27 y 34 DDT en los muestreos descritos anteriormente.

Determinación de análisis nutricional

El análisis nutricional (mg/100 mg PS de los macronutrientes y mg/kg PS de los micronutrientes) se realizaron en los dos muestreos realizados (27 y 34 DDT) a 6 lechugas por tratamiento, tanto para la parte aérea como para la raíz.

Se molió el material vegetal seco con un molinillo de aspas (IKA a10 basic, 25.000 rpm. IKA-Werke GmbH y Co. KG, Staufen, Alemania). Para el análisis del contenido mineral en las hojas, se llevaron a cabo dos protocolos de digestión:

- Para la de determinación de cationes, se realizó una digestión de 0,1 g de muestra, pesada en una balanza analítica (GRAM FS-120, Barcelona, España), con una solución que contenía 5 ml de ácido nítrico (HNO_3) y 3 ml de peróxido de hidrógeno (H_2O_2). La digestión de la materia orgánica se realizó en un microondas (CEM Mars X, Buckinghamshire, Reino Unido) programado por etapas, en el que se alcanzaba una temperatura de 200 °C en 20 minutos y se mantenía durante 2 horas. Una vez que el residuo resultante de la digestión se enfriaba a temperatura ambiente, cada tubo digestor era aforado a 25 ml con agua miliQ, y las muestras almacenadas en viales de centelleo hasta su análisis.
- Para la determinación de aniones, se homogeneizaron 0,05 g de muestra con 10 mL de agua desionizada, y se incubaron bajo agitación continua durante 30 min a 25 °C. A continuación, las muestras se centrifugaron a 10.000 g durante 20 minutos (Hettich, modelo UNIVERSAL 320. Andreas Hettich GmbH y Co., Tuttlingen, Alemania). Los sobrenadantes se recogieron y se filtraron a través de un filtro CHROMAFI Xtra PA-45/25 de 0,45 μm , y se utilizó la alícuota para el análisis de aniones.

Las muestras resultantes de los procesos descritos anteriormente se analizaron en el servicio de ionómica del CEBAS-CSIC, donde se determinó la concentración exacta de los distintos aniones y cationes mediante el uso de un ICP-OES (Iris Intrepid II, Thermo Electrón Corporation, Franklin, USA).

Determinación de parámetros de calidad

Antocianos

El contenido en antocianos (mg cianidina/Kg PF) se midió en el muestreo de las lechugas recolectadas a los 34 DDT, a razón de 6 lechugas por tratamiento. Se preparó un extractante 95 % etanol:1,5 N HCl en la relación 85:15 y se realizó una extracción 1:5 (300 mg de material vegetal fresco frente a 1,5 ml de extractante). El extractante se adicionó al material vegetal y se agitó vigorosamente en un vortex, incubándose las muestras durante toda la noche en oscuridad a 4 °C. Después se centrifugaron a 10.000 rpm durante 15 minutos a 4 °C y se recogió el sobrenadante. Para la lectura en la placa, se añadieron 200 μl a cada pocillo del espectrofotómetro y se midió la absorbancia a 530 nm y a 657 nm.

La recta patrón se realizó con cianidina-3-glucósido ($pm=484.86$ g/mol). La serie de diluciones se prepararon a partir de una solución madre de cianidina 0,25 mM (0,0061 g para 50 ml de disolución) y en el rango entre 0,001 mM y 0,075 mM:

A la absorbancia a 530 nm se le restó la lectura de cada punto a 657 nm y los blancos:

$$ABS_{530\text{ real}_n} = ABS_{530_n} - (ABS_{657_n} - ABS_{\text{Blanco } 657}) - ABS_{\text{Blanco } 530}$$

Con los valores de $ABS_{530\text{ real}}$ se calculó la concentración de antocianos.

Color

Los parámetros de color se midieron en el muestreo final (34 DDT) a razón de 18 medidas por tratamiento (3 medidas a 6 lechugas). En la Imagen 3.8 se pueden observar cómo se midieron. El color de las lechugas se determinó con un colorímetro triestímulo (Minolta CR400, Osaka, Japón) que expresa las coordenadas de color en valores CIEL a^*b^* en un espacio tridimensional. El colorímetro registra los parámetros L, a^* y b^* . El parámetro L indica la luminosidad, a^* Verde-rojo, b^* azul-amarillo, C el croma o saturación, y el parámetro h (ángulo Hue) el tono. Se realizaron 6 medidas por lechuga, tres en hojas externas y tres en hojas internas, seleccionando hojas sanas, sin síntomas de clorosis ni daños, tomando las medidas en la parte superior de la hoja sin nervaduras.

La luminosidad se define por el brillo de la muestra en una escala del 0 al 100, siendo 0 el mínimo brillo y 100 el máximo. El croma o saturación (C), se expresa en una escala de 0 a 100, donde el 0 es la mínima saturación y el 100 la máxima, y viene determinado por la raíz de la suma de los cuadrados de los parámetros a^* y b^* . El ángulo Hue representa el tono de las hojas en una escala de 0° a 360° , y es el cálculo de la arcotangente del ángulo formado por el parámetro a^* y el parámetro b^* , expresado en grados. Los resultados se expresan como Luminosidad (L), croma (C) y ángulo Hue (Hue), y son la media $\pm$ ES de todas las determinaciones realizadas en cada uno de los tratamientos.



Imagen 3.8. Medición de los parámetros de color en Lollo rosso con colorímetro Minolta CR400.

Clorofilas (uds. SPAD)

El contenido en clorofilas (uds. SPAD) se midió en el muestreo final (34 DDT) a 5 lechugas por tratamiento. El contenido de clorofila se midió en hojas completamente expandidas y sin síntomas de clorosis. Las medidas se realizaron con un instrumento portátil (Hansatech CL-01, King's Lynn, Inglaterra) que permite una detección no destructible, rápida y fiable, del contenido de clorofilas foliar. Los resultados se expresan en unidades SPAD y son la media $\pm$ ES de todas las medidas realizadas en cada tratamiento.

Pigmentos fotosintéticos (carotenoides y clorofila a, b y total)

El contenido de carotenoides clorofila a, b y total (mg/kg PF) se midió en el muestreo final realizado a los 34 DDT a 5 lechugas por tratamiento. Las muestras de hojas se homogeneizaron en un mortero con acetona al 80 % (v: v) en una proporción de 1:5 (w: v, hojas: acetona). Los homogeneizados obtenidos se centrifugaron a 15.000 rpm durante 5 minutos, y los sobrenadantes se recogieron y diluyeron 10 veces con acetona al 80 %. Las diferentes diluciones obtenidas se leyeron a 663 y 647 nm (A_{663} y A_{647}) para las clorofilas a y b, respectivamente, utilizando un espectrofotómetro UV/Vis (PowerWave XS2, BioTek, Winooski, Vermont, EEUU). El contenido en carotenoides (xantofilas y carotenos) se estimó a partir de los extractos diluidos midiendo la absorbancia a 470 nm (A_{470}). La concentración de clorofila a y b, y de carotenoides se obtuvieron en $\mu\text{g/mL}$, que se pasaron a mg/kg PF, de acuerdo con las ecuaciones de Lichtenthaler y Buschmann (2001).

$$\text{Chl a} = 12,25A_{663,2} - 2,79A_{646,8}$$

$$\text{Chl b} = 21,50A_{646,8} - 5,10A_{663,2}$$

$$\text{Carotenoides} = (1000A_{470} - 1,82\text{chl a} - 85,02\text{chl b}) / 198$$

3.2.7. Tratamiento estadístico de datos

Se utilizó el software Microsoft Excel 2016 (Microsoft, Washington, EEUU) para la gestión y tratamiento de datos, cálculo de valores medios, error estándar “ES”. Para la representación gráfica de resultados se utilizó SIGMAPLOT 14.5 (SYSTAT). Para el análisis estadístico, se utilizó el software Statistical Package for the Social Sciences 26 (SPSS) (IBM, New York, EEUU). Se determinó la existencia de la distribución normal en los datos por la prueba de normalidad según Shapiro-Wilk para tamaños de muestra (n) inferiores a 50 ($n < 50$) según Kolmogorov-Smirnov para $n > 50$. Se determinó la homogeneidad de las varianzas por el estadístico de Levene. Se realizó una prueba t de Student y un análisis ANOVA, con la prueba post-hoc de Duncan para la determinación de diferencias significativas entre tratamientos y de los subconjuntos, estableciéndose como diferencias significativas para $0,05 > p > 0,01$ y muy significativas para $p < 0,01$, y sin diferencias significativas (ns) para $p > 0,05$.

3.3. Resultados

3.3.1. Parámetros de producción

Biomasa y rendimiento productivo

En la figura 3.3 se pueden ver los parámetros de rendimiento agronómico de las dos cosechas realizadas durante el experimento. En ambas cosechas se observaron diferencias significativas entre los tratamientos aplicados tanto en el peso fresco de la PA como en la producción expresada por unidad de superficie. Así, en la cosecha inicial, el tratamiento “100% H” fue el que produjo el mayor peso fresco de la PA y producción por unidad de superficie, suponiendo un incremento significativo del 13,69 % con respecto al tratamiento “50% H”, sin embargo, no hubo diferencias significativas en esta primera cosecha entre los tratamientos “100% H” y “100 a 50% H”.

En la cosecha final se siguió la tendencia comentada anteriormente en la que la producción (peso fresco de la PA y producción por unidad de superficie) fue más alta para el tratamiento “100% H” seguido de “100 a 50% H” y “50% H”. En el tratamiento “100% H” estos parámetros alcanzaron valores alrededor de 94,89 g/planta y 1518,21 g/m², mientras que para el tratamiento “100 a 50% H” fueron de 84,60 g/planta y 1353,53 g/m², lo que representó una subida del 12,16 %. En cuanto al tratamiento “50% H”, éste presentó los valores más bajos, con 75,09 g/planta y 1201,43 g/m², representando el tratamiento “100% H” una subida del 26,37 % con respecto a éste.

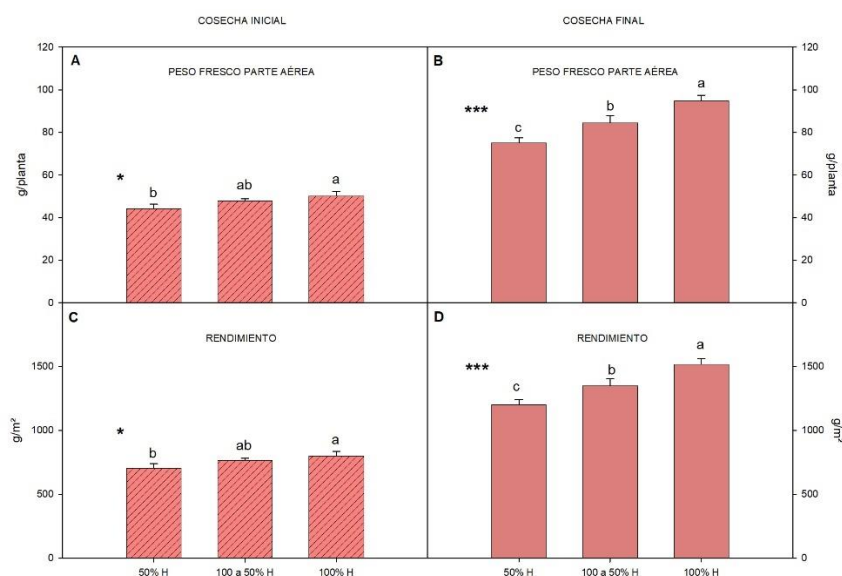


Figura 3.3. Peso fresco de la parte aérea (PA) y rendimientos para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en la cosecha inicial y final. (A) Peso fresco de PA (g/planta) en cosecha inicial. (B) Peso fresco de PA (g/planta) en cosecha final. (C) Rendimiento (g/m²) en cosecha inicial y (D) Rendimiento (g/m²) en cosecha final. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=10$. * y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

Parámetros de crecimiento vegetativo: longitud de tallo, peso fresco raíz, materia seca y contenido relativo de agua de la parte aérea y la raíz

En la tabla 3.4 se puede observar los resultados obtenidos en la evaluación de la longitud de tallo (cm), el peso fresco de raíz (g/planta), los contenidos de materia seca de PA y raíz (g ms/planta), y el contenido de agua (%) tanto de la PA como de la raíz para las dos cosechas realizadas durante el experimento. En la cosecha inicial no resultaron diferencias significativas entre los tratamientos propuestos para longitud de tallo, materia seca de PA, contenido relativo de agua de PA y peso fresco de raíz. En la cosecha inicial, el contenido en materia seca y el contenido relativo de agua de la raíz sí que presentaron diferencias significativas entre los tratamientos estudiados. El mayor contenido en materia seca en raíz fue observado en el tratamiento “100% H” con 0,37 g ms/planta, lo que supuso un aumento significativo con respecto a “50% H” del 42,31 %. Mientras que el mayor promedio de contenido relativo de agua en raíz se dio en el tratamiento “50% H” con un 95,27 %.

En la cosecha final, no se encontraron diferencias significativas en los parámetros de longitud de tallo, contenido en materia seca y contenido relativo de agua en la parte aérea. Mientras que sí se dieron diferencias significativas entre tratamientos para los parámetros de raíz: peso fresco, contenido en materia seca y contenido relativo de agua. En cuanto al peso fresco de la raíz, el tratamiento “100% H” obtuvo el valor medio más alto con 8,13 g/planta que supuso un incremento significativo del 6,46 % con respecto al tratamiento “50% H”. Con respecto al contenido en materia seca en raíz, el tratamiento “100% H” (0,46 g ms/planta) dio un valor más alto significativamente con respecto a los tratamientos “100 a 50% H” (0,34 g ms/planta) y “50% H” (0,22 g ms/planta). Por último, en cuanto al contenido relativo en agua en raíz, el tratamiento “50% H” fue el que mayor promedio dio con un valor de 96,52 %, lo que supuso un aumento significativo con respecto al tratamiento “100% H” que registró un valor de 94,01 %.

Tabla 3.4. Longitud de tallo (cm/planta), contenido en materia seca de PA (g ms/planta), contenido relativo de agua de PA (%), peso fresco de R (g/raíz), materia seca de R (g ms/planta) y contenido relativo de agua de R (%) para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en cosecha inicial y final.

COSECHA	TRATAMIENTO	Longitud tallo (cm/planta)	Materia seca PA (g ms/planta)	CRA PA (%)
Inicial	50% H	0,76	2,59	94,15
	100 a 50% H	0,74	2,87	94,02
	100% H	0,78	3,00	94,02
	ANOVA	ns	ns	ns
Final	50% H	1,07	3,90	94,81
	100 a 50% H	1,12	4,11	95,14
	100% H	1,23	5,13	94,59
	ANOVA	ns	ns	ns
COSECHA	TRATAMIENTO	PESO FRESCO RAÍZ (g/planta)	Materia seca RAÍZ (g ms/planta)	CRA RAÍZ (%)
Inicial	50% H	5,57	0,26 b	95,27 a
	100 a 50% H	5,85	0,33 ab	94,41 ab
	100% H	5,93	0,37 a	93,76 b
	ANOVA	ns	*	*
Final	50% H	6,32 b	0,22 c	96,52 a
	100 a 50% H	7,67 a	0,34 b	95,76 a
	100% H	8,13 a	0,46 a	94,01 b
	ANOVA	***	***	**

Los datos representan las medias con $n=6$ para todos los parámetros estudiados excepto $n=10$ (peso fresco de raíz). ns indica no significancia, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $P \geq 0.1$, $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$, $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

Evolución del crecimiento

El peso fresco de la parte aérea y de la raíz incrementó progresivamente al incrementar el desarrollo del cultivo en cada uno de los tratamientos. En el peso fresco de la PA se empezaron a observar diferencias entre tratamientos el día 27 DDT debido a que las plantas del tratamiento “100% H” tenía más peso que los otros dos tratamientos (Fig. 3.4). Estas diferencias se hicieron más acusadas en el día 34 DDT, siendo el peso fresco de las plantas del tratamiento “100% H” mayor que las del resto de tratamientos. Entre los tratamientos “50% H” y “100 a 50% H” también se observaron diferencias entre ellas, ya que las plantas del tratamiento “100 a 50% H” tuvieron un mayor peso que las del tratamiento “50% H”. La evolución del peso fresco de la raíz siguió un modelo parecido al del peso fresco de las hojas, al incrementar este parámetro con el tiempo dándose un mayor peso en las plantas del tratamiento “100% H” a los 34 DDT con respecto a los otros dos tratamientos, los cuales no dieron diferencias significativas entre ellos.

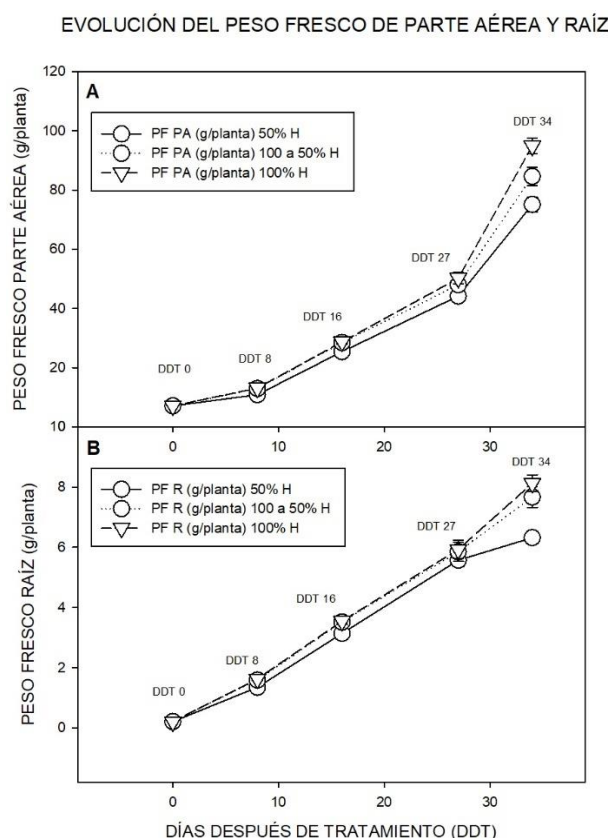


Figura 3.4. Evolución del peso fresco (g/planta) de (A) la parte aérea, PA, y (B) de la raíz durante el cultivo de lechuga para los tratamientos “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H”. Los pesos fueron recogidos en los DDT 0, 8, 16, 27 y 34. Cada valor es la media de 10 lechugas.

3.3.2. Estado nutricional del cultivo

Estado nutricional de la parte aérea

En la figura 3.5 se dan las concentraciones foliares de los aniones nitratos y cloruros (mg/100 mg PS) para los diferentes tratamientos en las dos cosechas realizadas durante el experimento. En la cosecha inicial no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ensayados en los cloruros, alcanzando un valor promedio de 1,28 mg/100 mg PS. Sin embargo, en los nitratos sí que se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ensayados, siendo el tratamiento “100% H” el que mayor contenido tuvo, con un valor medio de 7,80 mg/100 mg PS lo que supone subidas significativas del 39,48 % y del 48,98 % con respecto a los tratamientos “100 a 50% H” y “50% H”, respectivamente.

En la cosecha final, se encontraron diferencias significativas entre tratamientos en el contenido de nitratos y cloruros. En el caso de los nitratos, el tratamiento “100% H” presentó un valor medio de 11,52 mg/100g PS, bastante superior a los valores de 9,01 y 8,38 mg/100g PS que presentaron las plantas de los tratamientos “100 a 50% H” y “50% H”, respectivamente. En el

caso de los cloruros, el tratamiento “100% H” y “100 a 50% H” no presentaron diferencias significativas entre ellos, teniendo valores superiores al del tratamiento “50% H”.

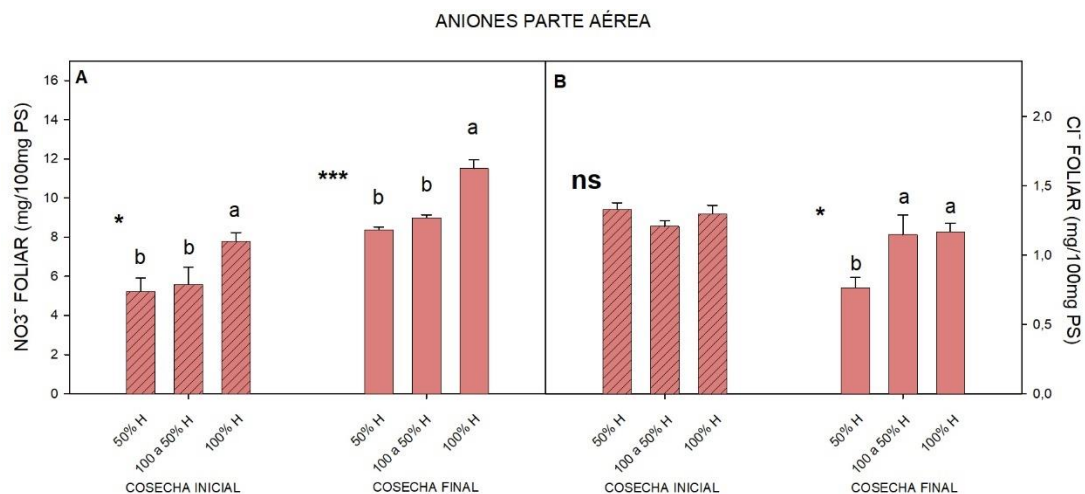


Figura 3.5. Concentración de aniones en hoja (mg/100mg PS) para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en cosecha inicial y final: (A) nitratos y (B) cloruros. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=6$. ns indica no significancia, mientras que * y *** indican diferentes grados de significancia con $P \geq 0.1$, $0.1 > P \geq 0.01$, $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

En la figura 3.6 se muestra la concentración foliar de los macronutrientes (mg/100 mg PS) para los diferentes tratamientos en la cosecha inicial y final realizadas en el experimento. En la cosecha inicial no se encontraron diferencias significativas en el fósforo, mientras que en potasio, calcio, azufre, magnesio y sodio sí que hubo diferencias significativas entre los diferentes tratamientos. En el caso del potasio, los valores más altos los presentan las plantas de los tratamientos “100% H” y “100 a 50% H”, entre los cuales no se dieron diferencias significativas, con una media de 6,8 y 6,6 mg/100 mg PS, respectivamente, lo que supuso un aumento del 13,32 % y del 10,47 % respecto al tratamiento “50% H”. En cuanto al calcio, el tratamiento que mayor valor medio obtuvo fue el “100% H” presentando diferencias significativas únicamente con el tratamiento “50% H”. En el caso del azufre y sodio, para ambos nutrientes, la concentración fue similar para los tratamientos “100 a 50% H” y “50% H”, siendo significativamente más baja que la obtenida en las plantas de “100% H”.

En la cosecha final, el fósforo y sodio fueron los nutrientes que no presentaron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos ensayados. En cuanto al contenido de potasio en la parte aérea no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos “50% H” y “100 a 50% H”, siendo la concentración de las plantas de estos tratamientos más baja que para las plantas del tratamiento “100% H”. En el Ca, Mg y S se observó un mismo comportamiento, las plantas tratadas con “100% H” tuvieron una mayor concentración que las plantas de los otros dos

tratamientos, siendo los valores estadísticamente significativos solo para las del tratamiento “50% H”.

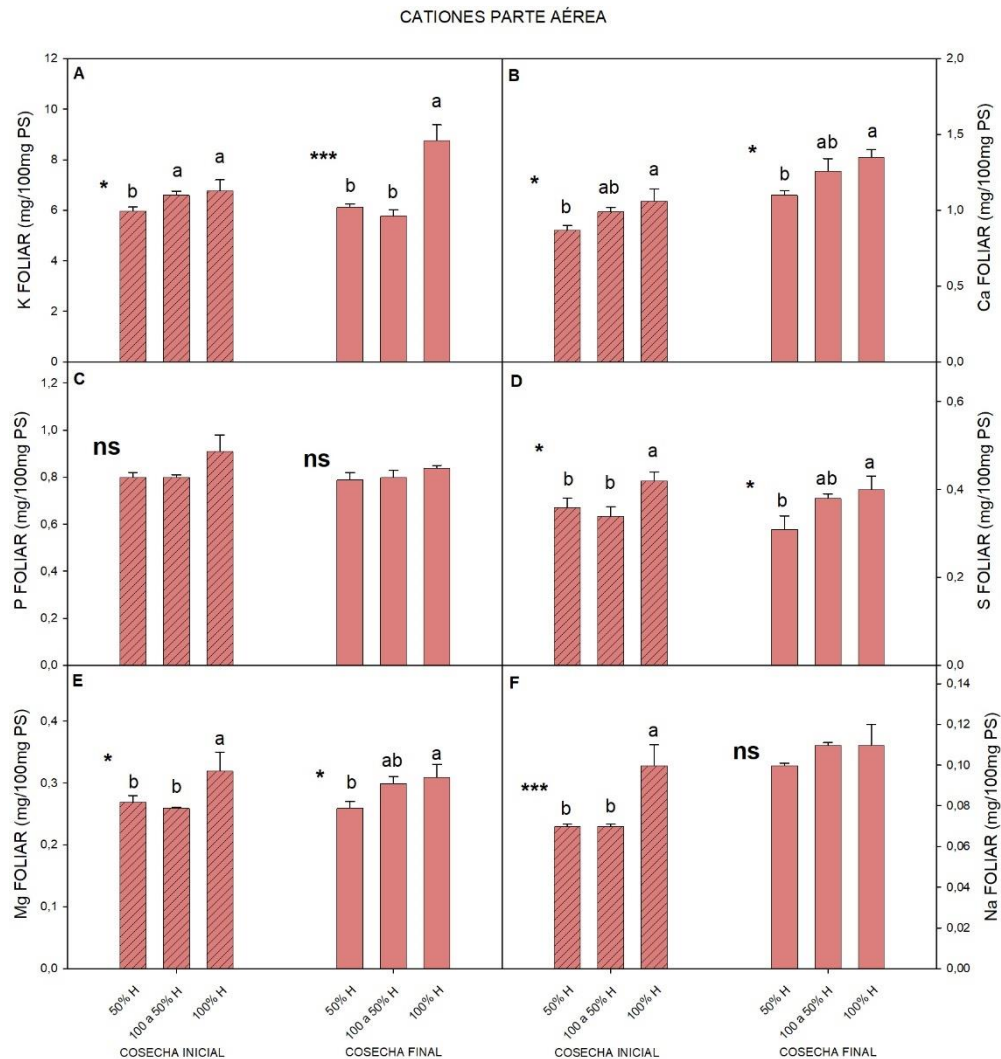


Figura 3.6. Concentración de cationes macronutrientes en hoja (mg/100mg PS) para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en cosecha inicial y final: (A) potasio, (B) calcio, (C) fósforo, (D) azufre, (E) magnesio y (F) sodio. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=6$. ns indica no significancia, mientras que * y *** indican diferentes grados de significancia con $P \geq 0.1$, $0.1 > P \geq 0.01$, $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

En la figura 3.7 se presentan la concentración foliar (mg/kg PS) de micronutrientes en las plantas de cada uno de los tratamientos. En la cosecha inicial, salvo en el contenido de cobre, no se encontraron diferencias significativas en ninguno de los micronutrientes estudiados. Boro, hierro, manganeso, molibdeno y zinc presentaron unos valores medios de 31,6, 122,9, 83,7 y 115,25 mg/kg PS, respectivamente. En el cobre se obtuvo el mayor valor en el tratamiento “100% H” con 14,9 mg/kg PS, que supuso un aumento significativo del 24,17 % con respecto al tratamiento “50% H”.

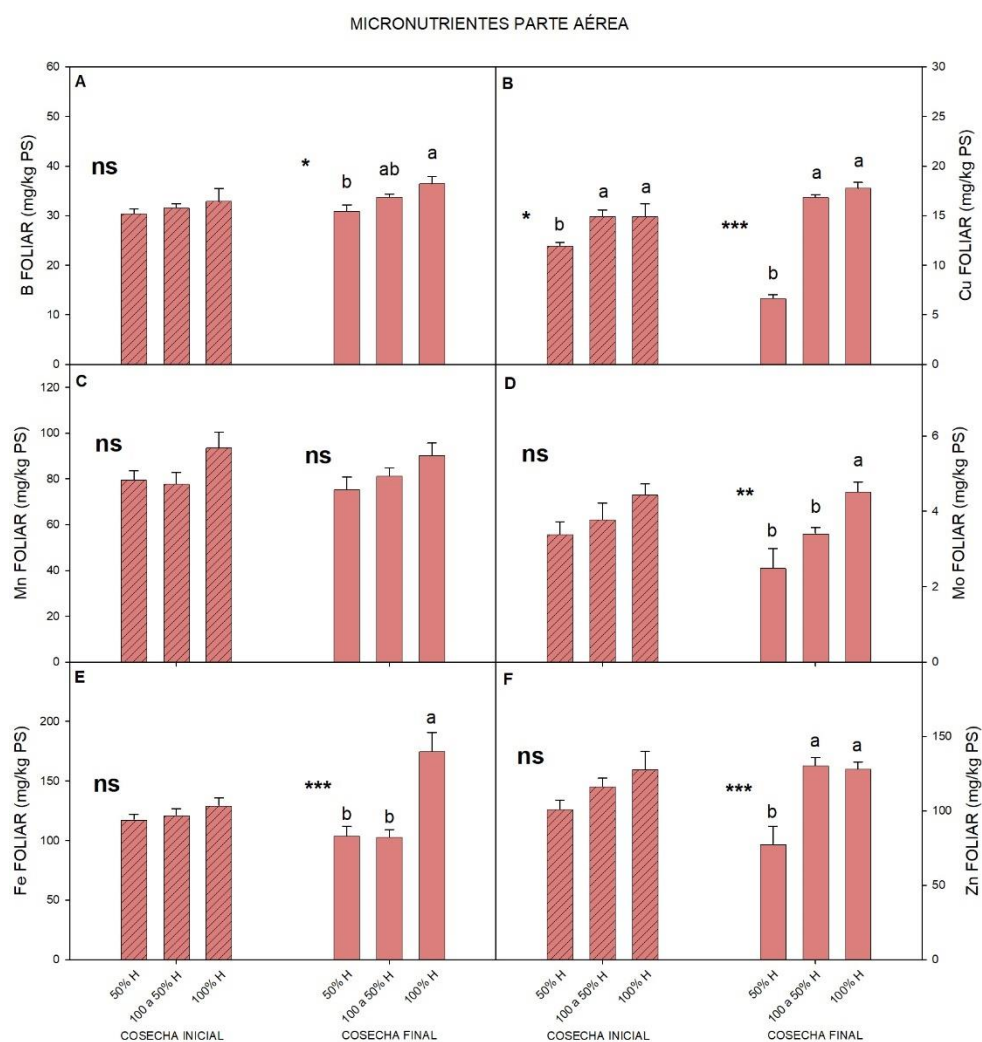


Figura 3.7. Concentración de micronutrientes en hoja (mg/kg PS) para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en cosecha inicial y final: (A) boro, (B) cobre, (C) manganeso, (D) molibdeno, (E) hierro y (F) zinc. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=6$. ns indica no significancia, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $P \geq 0.1$, $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$, $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

En la cosecha final no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en el manganeso (82,3 mg/kg PS de valor medio), mientras que en el resto de micronutrientes sí se encontraron diferencias significativas. En el Boro se dieron diferencias significativas entre los tratamientos “100% H” y “50% H”, debido al incremento del 17,86 % del primero con respecto al segundo. En cuanto al cobre, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos “100% H” y “100 a 50% H”, mientras que se dio una disminución de la concentración en el tratamiento “50% H” de 61 % con respecto a los dos primeros. El contenido de zinc sigue un comportamiento similar al observado en el cobre al no encontrarse diferencias significativas entre los tratamientos “100% H” y “100 a 50% H”, mientras que se observa un descenso significativo del tratamiento “50% H” del 40 % con respecto a los anteriores. En el molibdeno no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos “50% H” y “100 a 50% H”, siendo

los valores de estos más pequeños que los del tratamiento “100% H”. Por último, en el hierro sigue una dinámica similar a la observada en molibdeno, al no encontrarse diferencias significativas entre los tratamientos “50% H” y “100 a 50% H”, mientras que se dio una subida significativa en el tratamiento “100% H” de 68 % con respecto a los dos primeros.

Estado nutricional de la raíz

En la figura 3.8 se muestran las concentraciones de los aniones nitrato y cloruro en raíz. En la cosecha inicial no se encontraron diferencias significativas en el contenido de ninguno de los aniones analizados, presentando unos valores medios de 7,07 y 0,47 mg/100 mg PS para nitratos y cloruros, respectivamente.

En la cosecha final se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos tanto para los nitratos como para los cloruros, siendo en los dos casos el tratamiento que presentó mayores valores el de “100% H”, aunque no de forma significativa en el cloruro con respecto al tratamiento “100 a 50% H”.

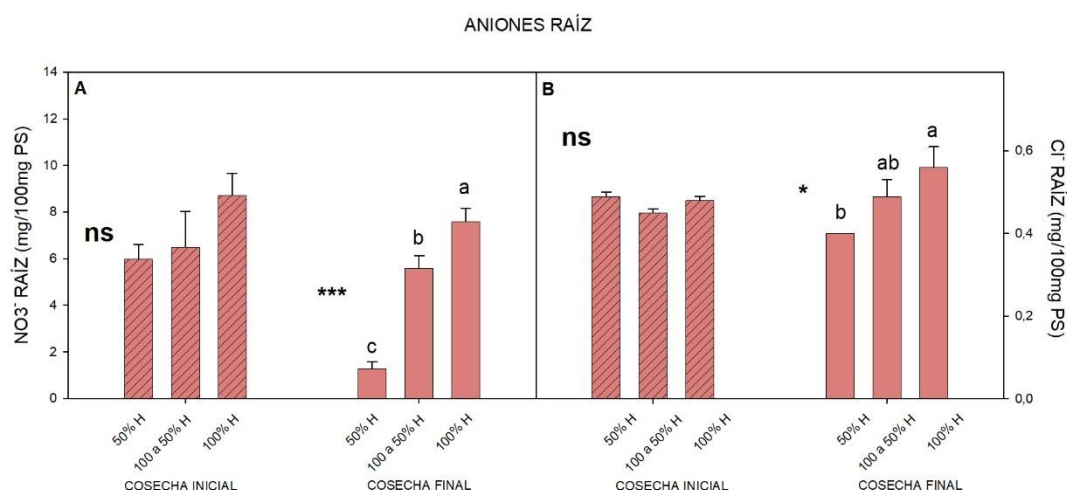


Figura 3.8. Concentración de aniones en la raíz (mg/100mg PS) para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en cosecha inicial y final: (A) nitratos y (B) cloruros. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=6$. ns indica no significancia, mientras que * y *** indican diferentes grados de significancia con $P \geq 0.1$, $0.1 > P \geq 0.01$, $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

En la figura 3.9 se pueden observar la concentración de los macronutrientes en la raíz para los diferentes tratamientos ensayados para la cosecha inicial y final. En la cosecha inicial, exceptuando el sodio, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos para los diferentes macronutrientes estudiados obteniendo valores de 5,6, 0,47, 1,5, 1,1 y 0,13 mg/100 mg PS para potasio, calcio, fósforo, azufre y magnesio, respectivamente. En cuanto al sodio, sí que se presentaron diferencias significativas, siendo el tratamiento “100 a 50% H” el que mayor concentración tuvo, lo que supuso un aumento del 23,47 % y 62,83 % respecto a los tratamientos “100% H” y “50% H”, respectivamente.

En la cosecha final, no se observaron diferencias significativas en el potasio, calcio, azufre y sodio entre los diferentes tratamientos ensayados, teniendo los valores medios de 6,1, 0,49, 1,11 y 0,45 mg/100 mg PS, respectivamente. El fósforo y magnesio sí que presentaron diferencias significativas entre los tratamientos. En el fósforo se observó una subida significativa del tratamiento “100% H” del 11% con respecto a las plantas tratadas con “50% H” y “100 a 50% H”. Por último, en el magnesio se observaron diferencias significativas entre el tratamiento “100% H” y el tratamiento “50% H”, con una subida de 12,55 % del primero respecto al segundo.

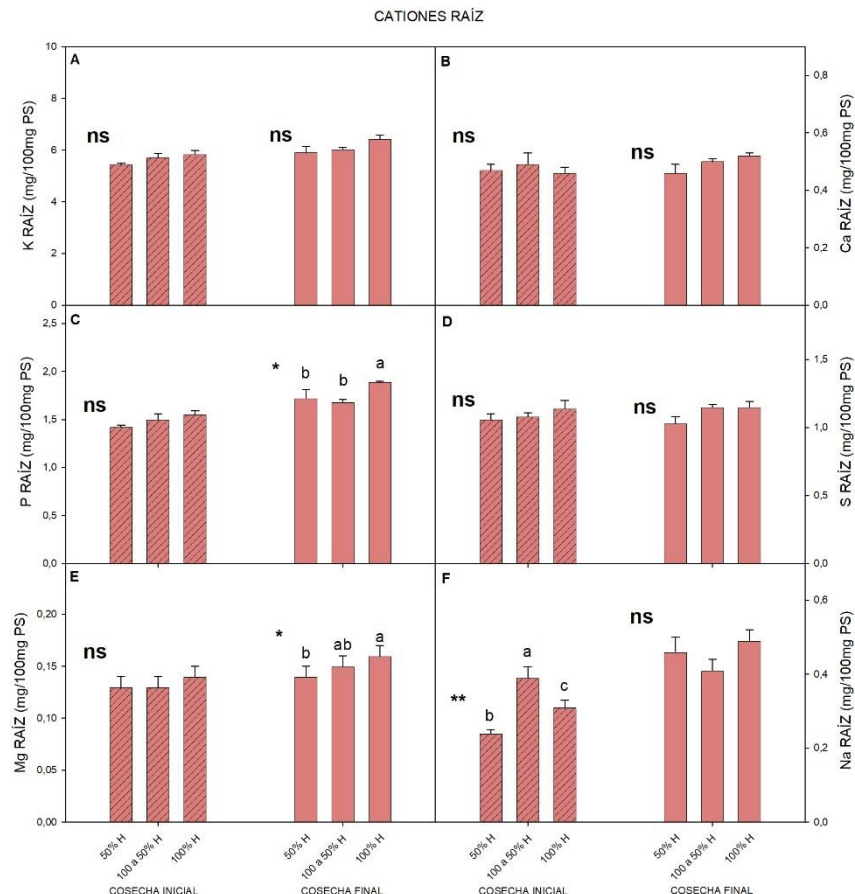


Figura 3.9. Concentración de macronutrientes en la raíz (mg/100mg PS) para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en cosecha inicial y final: (A) potasio, (B) calcio, (C) fósforo, (D) azufre, (E) magnesio y (F) sodio. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=6$. ns indica no significancia, mientras que * y ** indican diferentes grados de significancia con $P \geq 0.1$, $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

En la figura 3.10 se puede muestra el contenido de micronutrientes (mg/kg PS) presentes en raíz para los diferentes tratamientos en la cosecha inicial y final. En la primera de ellas no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos para el boro, molibdeno y hierro que presentaron unos valores medios de 32,7, 21,6 y 445,8 mg/kg PS, respectivamente. Mientras que el cobre, manganeso y zinc se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos. En el caso del cobre, el tratamiento “50% H” sufrió un descenso significativo del 17,73 % y 26,59 %

con respecto a los otros dos tratamientos. En cambio, al manganeso y zinc el tratamiento “50% H” incrementó significativamente la concentración con respecto a los otros tratamientos.

En la cosecha final, y al igual que ocurrió en la primera cosecha, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos para los micronutrientes boro, molibdeno y hierro, que presentaron unos valores medios de 33,6, 24,4 y 566,2 mg/kg PS, respectivamente. En el resto de nutrientes sí se observaron diferencias significativas entre los diferentes tratamientos. Cobre y zinc tuvieron comportamientos similares, no encontrándose diferencias significativas entre los tratamientos “50% H” y “100 a 50% H”, mientras que el tratamiento “100% H” tuvo una mayor concentración que los otros dos. Por último, en cuanto al manganeso, se observaron diferencias significativas entre los tratamientos “100% H” y “100 a 50% H”, presentando este último una subida del 50,49 % con respecto al primero.

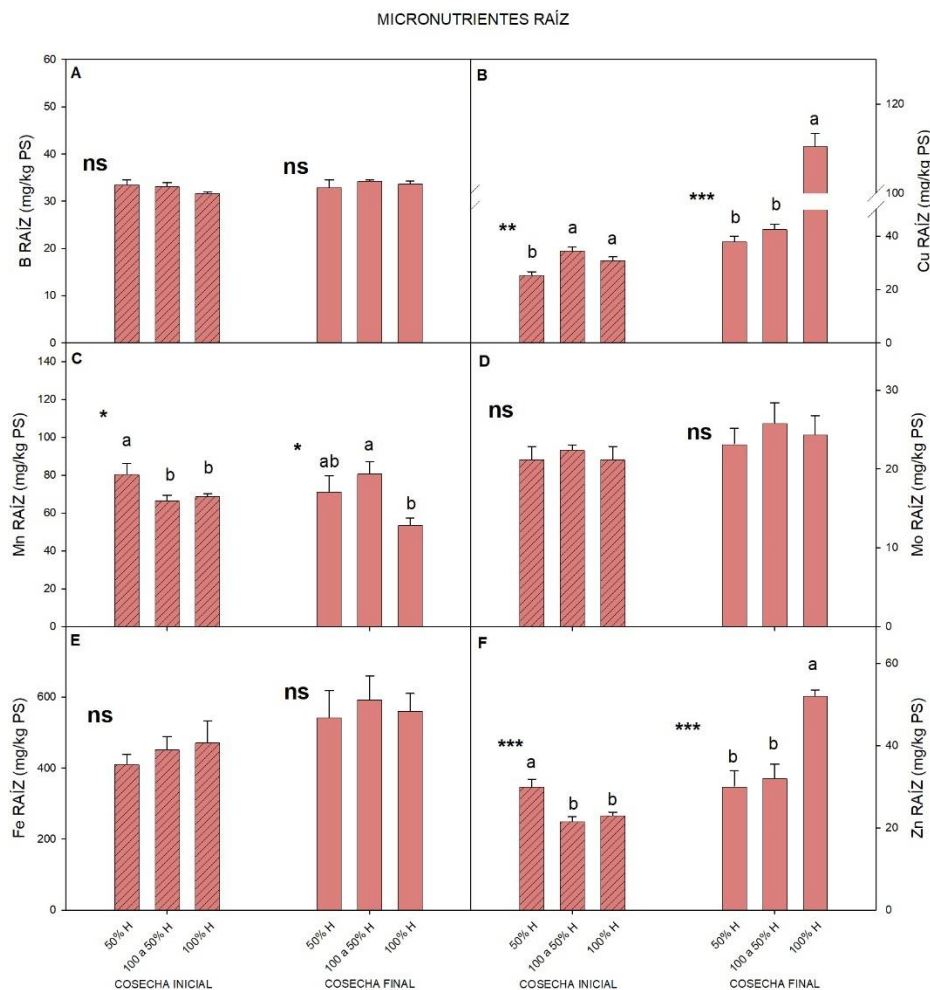


Figura 3.10. Concentración de micronutrientes en la raíz (mg/kg PS) para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en cosecha inicial y final: (A) boro, (B) cobre, (C) manganeso, (D) molibdeno, (E) hierro y (F) zinc. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=6$. ns indica no significancia, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $P \geq 0.1$, $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$, $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

3.3.3. Parámetros de calidad

Color, antocianos y clorofilas (SPAD)

En la tabla 3.5 se pueden observar los diferentes parámetros de color medidos en hojas: Luminosidad (esc. 0-100), Cromaticidad a y b (esc. 0-100), Saturación (esc. 0-100) y Ángulo Hue (grados), así como el contenido de antocianos (mg cianidina/Kg pf) y clorofila (uds. SPAD) para lechugas de la cosecha final. La luminosidad, cromaticidad (b^*) y ángulo HUE no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos estudiados, dando unos valores medios de 36,94, 15,70 y $71,00^\circ$ respectivamente. Mientras, los parámetros cromaticidad (a^*) y saturación C arrojaron diferencias significativas entre los tratamientos estudiados. En la cromaticidad (a^*) y la saturación (C) el valor más alto se obtuvo en el tratamiento “100 a 50% H” con 7,06 y 18,37 respectivamente. Aunque en este último parámetro no se dieron diferencias significativas con el tratamiento “50% H”.

En cuanto al contenido en antocianos se observaron diferencias significativas entre los tratamientos “100% H” y los tratamientos “100 a 50% H” y “50% H”, presentando el primero un valor medio de 17,18 mg cianidina/kg PF, lo que supone una subida del 54,22 % y del 73,71 % respecto a los tratamientos “100 a 50% H” y “50% H”, no resultando diferencias entre estos dos últimos. En el estudio de las clorofilas (Uds. SPAD) el mayor valor se obtuvo en el tratamiento “100% H”, con 4,25 Unidades SPAD, lo que supuso un incremento significativo del 49,65% con respecto el tratamiento “50% H”. El tratamiento “100 a 50% H” no presentó diferencias significativas con ninguno de los otros dos tratamientos.

Tabla 3.5. Parámetros que determinan el color en hoja: Luminosidad (esc. 0-100), Cromaticidad a y b (esc. 0-100), Saturación (esc. 0-100) y Ángulo Hue (grados). Contenido de antocianos (mg cianidina/Kg mf) y clorofila (uds. SPAD) en hoja para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en la cosecha final.

COSECHA	TRAT.	LUM. L*	CROMA. a*	CROMA. b*	SATUR. C	ÁNG. HUE (°)
Final	50% H	36,59	3,90 b	16,47	17,13 ab	75,49
	100 a 50% H	38,20	7,06 a	15,93	18,37 a	67,82
	100% H	36,03	4,80 b	14,71	16,13 b	69,69
	ANOVA	ns	**	ns	*	ns
COSECHA	TRAT.	ANTOCIANOS (mg cianidina/Kg PF)		CLOROFILA (Uds. SPAD)		
Final	50% H	9,89 b		2,84 b		
	100 a 50% H	11,14 b		3,93 ab		
	100% H	17,18 a		4,25 a		
	ANOVA	***		*		

Los datos representan las medias con $n=19$ (parámetros de color), $n=6$ (antocianos) y $n=5$ (clorofilas). ns indica no significancia, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $P \geq 0.1$, $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$, $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

Pigmentos fotosintéticos (carotenoides y clorofila a, b y total)

La figura 3.11 muestra el contenido de carotenoides y clorofilas en la parte aérea (mg/kg PF). En los carotenoides no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos estudiados. En las clorofilas se registraron diferencias significativas entre tratamientos en el contenido de la clorofila *b*, mientras que el contenido de clorofila *a* y de clorofila total no arrojaron diferencias significativas entre los tres tratamientos. Las diferencias significativas en la clorofila *b* se debieron a que los mayores valores se obtuvieron en el tratamiento “100% H” con un valor medio de 62,95 mg/kg PF, lo que supuso una subida significativa del 90,57 % con respecto al tratamiento “50% H” (33,03 mg/kg PF). Sin embargo, este último tratamiento no presentó diferencias significativas con el tratamiento “100 a 50% H”.

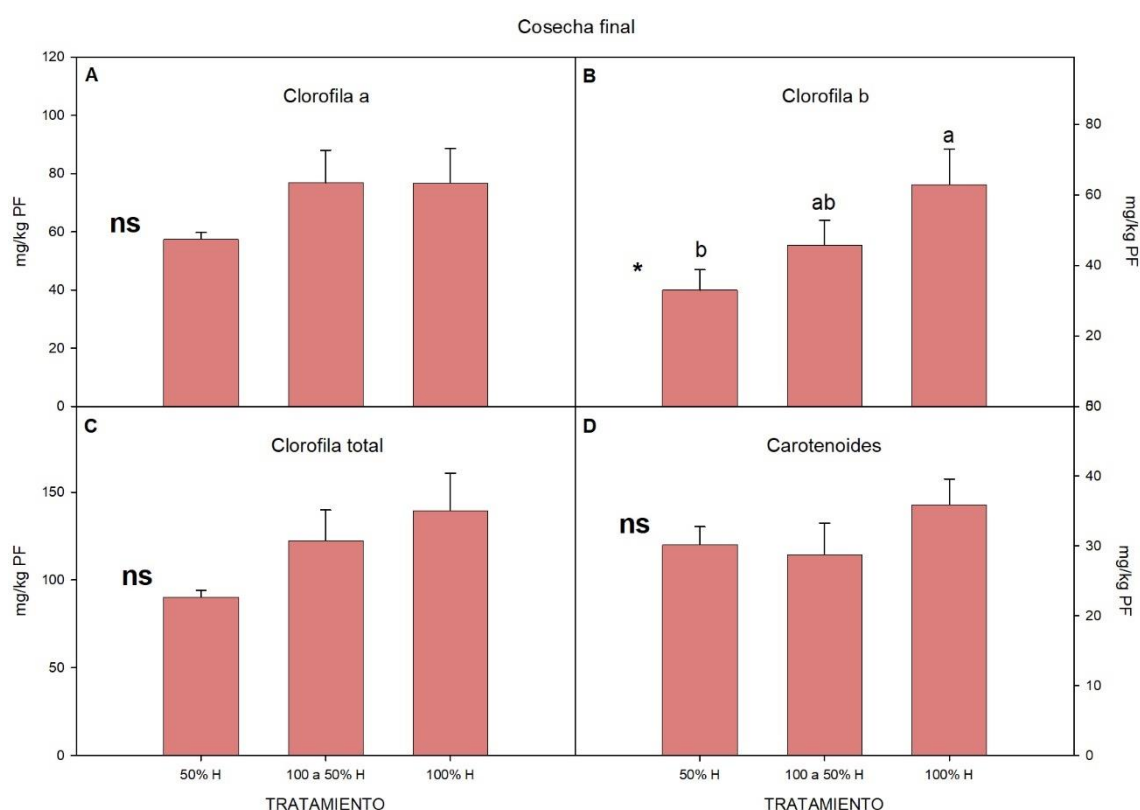


Figura 3.11. Concentración de Carotenoides (Izquierda) y Clorofilas (Derecha) en hoja (mg/kg PF) para “50% H”, “100 a 50% H” y “100% H” en cosecha final: (A) clorofila a, (B) clorofilas b y (C) clorofila total. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que * indica significancia para $0.1 > P \geq 0.01$. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

3.4. Discusión

La puesta en marcha de cultivos hidropónicos a raíz desnuda para la producción de hortalizas de hoja como la lechuga ha experimentado un auge en las últimas décadas (Alberici et al., 2008). Este tipo de sistemas de cultivo favorece el crecimiento óptimo de las plantas logrando mejorar el rendimiento y calidad de la cosecha con respecto a su cultivo tradicional, aunque su eficiencia depende de muchos factores como las condiciones ambientales, composición química de la solución nutritiva, variedad de cultivo, gestión de plagas y enfermedades, y el tratamiento postcosecha (Fallov et al., 2009; Kader, 2008; Spehia et al., 2018). Entre estos factores, la composición de nutrientes de la SN en este tipo de sistemas es un aspecto crucial para el éxito de la producción de lechuga y de esto depende, en gran medida, su rendimiento productivo y la calidad del producto final. En este sentido, este experimento tuvo como objetivo optimizar la composición y manejo de la SN para plantas de lechuga Lollo Rosso cultivadas en este tipo de sistemas. Por lo tanto, para conocer cómo afecta la concentración de nutrientes de la SN a los parámetros productivos y de calidad en un sistema de cultivo flotante a raíz desnuda, se ensayaron tres concentraciones diferentes de SN que consistían en SN Hoagland al 100% durante todo el ciclo de cultivo (“100% H”), SN Hoagland al 100% que cambió al 50% antes de la primera cosecha (“100 a 50% H”) y SN Hoagland al 50% durante todo el cultivo (“50% H”).

De los tres tratamientos ensayados el mejor a nivel productivo fue el “100% H”, ya que con este manejo se obtuvieron plantas de mayor peso, lo que supuso incrementar el rendimiento de la producción por superficie. Así, mientras que el tratamiento “100% H” tuvo un rendimiento de 94,89 g/planta (1.518,21 g/m²), la aplicación de los otros tratamientos supuso descensos significativos en la producción con respecto a “100% H”, obteniendo unos rendimientos decrecientes con la disminución de la concentración de nutrientes de la SN con 84,60 y 75,09 g/planta (1.353,53 y 1.201,43 g/m² respectivamente) para los tratamientos “100 a 50% H” y “50% H”. En otros experimentos donde se han ensayado diferentes concentraciones de nutrientes en la SN en sistemas hidropónicos flotantes se ha visto como la optimización de la SN conlleva alcanzar altos rendimientos. Sapkota y col. (2019) ensayaron cuatro niveles de concentración de los macronutrientes N, K y Ca, sin cambiar la concentración de P, Mg, B y Zn, en un cultivo de lechuga en sistema flotante, encontrando los mayores valores productivos cuando se usó la SN compuesta por N 17,85 mM, K 7,67 mM y Ca 6,24 mM. Fallov y col. (2019) obtuvieron en plantas de lechuga (var. Acephala) cultivadas en sistema hidropónico flotante que la mejor SN fue la que tenía una carga de nutrientes equivalentes a 34 meq/l. Volviendo con nuestro estudio, el mejor rendimiento agronómico en las lechugas del tratamiento “100% H” pudo ser debido a que en la fase final del experimento esta SN fue la única que suministró la cantidad de nutrientes necesarios para que crecieran las plantas. Esto queda avalado porque, como se puede ver en la figura 2, desde el día DDT21 al día DDT34 (cosecha final) se observa como el tratamiento “100%

H” produjo plantas de mayor tamaño que el resto de tratamientos para este periodo de tiempo. Así, cuando las plantas alcanzaron un tamaño de 40 g de parte aérea empezaron a demandar una cantidad de nutrientes que no pudo ser suministrado por los tratamientos “100 a 50% H” y “50% H”. Con estos datos se sugiere que para próximos experimentos se ensayen tratamientos con “50% H” hasta DDT21, y después de ese día pasar de “50% H” a “100% H”, coincidiendo con el momento de desarrollo de la planta en el que demanda mayor cantidad de nutrientes.

Las plantas de los tres tratamientos tuvieron una concentración foliar de nutrientes dentro del rango de normalidad según los rangos definidos por Kim y col. (2016) y USDA (2021), no mostrando deficiencias ni toxicidades en ninguno de los tres tratamientos ensayados para la cosecha inicial y cosecha final. En los tratamientos de “50% H” y “100 a 50% H” no se observaron problemas de deficiencia seguramente porque la disminución del crecimiento produjo un efecto de concentración de nutrientes minerales en el tejido vegetal de tal manera que la falta de suministro de nutrientes a las plantas, por la baja concentración de estos en la SN, quedó enmascarada. Otros autores han estudiado cómo afectan los cambios en la concentración de nutrientes en la SN en la composición mineral de las hojas. En cuanto al N, Fallovo y col. (2009) ponen de manifiesto que, tanto para los ciclos vegetativos de primavera como de verano, existe un aumento significativo de la concentración de nitrógeno conforme aumenta la concentración de nutrientes en la SN, estableciendo la concentración óptima entre 50 y 66 meq/l. En P y K, la mayor concentración en las hojas se dio con la SN de 34 y 50 meq/l, respectivamente, a partir de la cual los aumentos de concentración de nutrientes conllevan una disminución de los niveles de estos elementos en la hoja. En el contenido de Mg, estos autores observaron un aumento lineal y significativo conforme se aumentaba la concentración de nutrientes en la SN. Tsouvaltzis y col. (2020), sin embargo, observaron como la reducción del N en un 50 % en la SN de lechuga verde no provocó la reducción del contenido foliar de N, K, P, Ca, Mg y Mn.

El contenido de nitratos en hoja es uno de los principales componentes de calidad en el cultivo de la lechuga (Da Luz y Medeiros, 2015; Maynard et al., 1976). Los nitratos, en concreto los compuestos derivados de su metabolismo, pueden ser muy perjudiciales para la salud, por lo que la Unión Europea, dentro de su ámbito de actuación, establece unos niveles máximos en lechuga dependiendo de la época del cultivo. Este límite viene establecido por el *REGLAMENTO (UE) N. 1258/2011 DE LA COMISIÓN de 2 de diciembre de 2011 que modifica el Reglamento (CE) n. 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de nitratos en los productos alimenticios*, que establece para lechugas frescas cultivadas en invernadero y recolectadas entre el 1 de octubre y el 31 de marzo el límite máximo debe ser de 5.000 mg NO₃⁻/kg PF. En nuestro experimento se observa cómo hay una relación directa entre el contenido de nitratos en la SN y la acumulación de nitratos en hoja, siendo el tratamiento “100% H” el que presentó un mayor valor con 5.762,33 mg/kg PF, bastante superior a los valores de 4.506,67 y 4.194,33 mg/kg PF

que presentaron los tratamientos “100 a 50% H” y “50% H”. Los tratamientos “50% H” y “100 a 50% H” cumplieron la norma, mientras que el tratamiento “100% H” sobrepasó en 762,33 mg/kg PF, lo que representó un incremento del 15,25 % sobre el límite máximo permitido por la normativa. Esto sugiere que la optimización de la SN en cultivos de lechuga en raíz flotante también debe tener en cuenta, además del rendimiento productivo, la concentración foliar de nitratos para que la cosecha cumpla el reglamento europeo, de lo contrario, aunque la producción sea alta no se podría vender.

En cuanto a la calidad de las lechugas, el tratamiento “100% H” también destacó sobre el resto ya que tuvo una mayor concentración de antocianos, clorofilas y Ca. Estos compuestos son importantes porque, en el caso de los antocianos, tienen una alta actividad antioxidante, mucho mayor que las vitaminas C y E (Rice-Evans y Miller, 1994), por lo que su consumo es importante en una dieta equilibrada. Además, los antocianos son importantes desde el punto de vista comercial al contribuir, junto con otros polifenoles al color y sabor de la lechuga (Luna, 2017). El contenido en clorofilas en hoja constituye una de las variables que más utilizan los consumidores para elegir estos productos, ya que a más clorofilas, color verde más intenso, da la sensación de un producto más saludable y apetitoso (Callejas y col., 2013; Steele y col., 2008). Otros experimentos también han evaluado el comportamiento de la calidad organoléptica de las lechugas ante diferentes soluciones nutritivas. Así, mientras Tsouvaltzis y col. (2020) no observaron cambios en la concentración de antocianos en lechuga roja (cv. Carmesi) cultivada con diferentes concentraciones de nitrógeno, Luna y col. (2013) observaron en plantas de Lollo Rosso cultivadas en el sistema hidropónico New Grow System (NGS), que el incremento del nitrógeno en la solución nutritiva disminuyó la concentración de antocianos. En el caso de las clorofilas, Mahlangu y col. (2016) en lechuga y Miller y col. (2011) en un cultivo de *Oxalis regnellii* y *Oxalis triangularis* observaron que un aumento progresivo del nitrógeno en la SN supuso un aumento lineal de las clorofilas. Mientras, Urlic y col. (2017) en rúcula no observaron ningún efecto significativo en las clorofilas con respecto a la concentración de N en la SN. En nuestro estudio, los resultados coinciden con los dos primeros, en los que la mayor concentración de nitrógeno en la solución nutritiva de plantas del tratamiento “100% H” produjo lechugas con mayor concentración de clorofilas. En cuanto al contenido de Ca en hojas, en la bibliografía hay estudios con resultados opuestos. Tsouvaltzis y col. 2020 no encontraron cambios significativos en el Ca en lechugas al variar las concentraciones de nutrientes en la SN. Mientras, Öztekin y col. (2018), en espinaca, observaron un aumento del Ca al disminuir la concentración de nutrientes en la SN un 50 %.

En los otros parámetros de calidad medidos en nuestro estudio como carotenoides, color, contenido de materia seca no se observaron cambios significativos entre los tratamientos. Sin embargo, en variedades y sistemas de cultivo diferentes a las de este experimento sí que se han

observado cambios en estos parámetros en relación a la composición de la SN. Alberici y col. (2008), en un ensayo de lechuga, destinada a la industria de IV gama, cultivada en un sistema hidropónico flotante con tres SN que variaban en la concentración de nutrientes (100, 50 y 25 %) observaron que los carotenoides totales en hoja no variaban con la concentración de nutrientes en los ciclos de primavera y verano. En cambio, en otoño sí que encontraron diferencias significativas entre tratamientos, obteniendo que el tratamiento de SN al 50 % fue el que mayor valor medio de carotenoides tuvo, produciendo un incremento del 63,11 y 22,74 % con respecto a los tratamientos de SN al 100 % y SN al 25 %. En cuanto al contenido de materia seca, Fallovo y col. (2019) estudiaron el cultivo de lechuga (var. *Acephala*, cv. ‘Green Salad Bowl’) en un sistema hidropónico flotante con cinco concentraciones de SN (2, 18, 34, 50 y 66 meq/l), observando un aumento de forma cuadrática de este parámetro conforme aumentó la concentración de nutrientes. Los mayores niveles de materia orgánica se dieron con una concentración de nutrientes de 37 para primavera y de 43 meq/l para verano. Luna y col. (2013), realizaron un experimento para optimizar la SN en sistema hidropónico New Grow System (NGS, Almería, España) en campo abierto con tres variedades de lechuga: Lollo rosso (cv. *Evasion*) y Hoja de Roble rojo (cv. *Jamai*) y Butterhead (cv. *Daguan*). Aplicaron tres diferentes concentraciones de SN consistentes en la reducción de NO_3^- , NH_4^+ , Ca^{2+} y K^+ , y, también encontraron que cambios en la concentración de la SN causaron diferencias significativas en cuanto al contenido de materia seca en la parte aérea en las tres variedades, siendo la concentración más baja de nutrientes la que mayor contenido de materia seca produjo. En los parámetros de color, un estudio realizado por Fallovo y col. (2019), en lechugas (var. *Acephala*, cv. ‘Green Salad Bowl’) cultivadas en un sistema hidropónico flotante y con cinco diferentes concentraciones de nutrientes en la SN (2, 18, 34, 50 y 66 meq/l), dio como resultado que los parámetros de color de las hojas L^* , a^* y b^* estuvieron muy influenciados por la concentración de la solución nutritiva. Los valores de L^* y a^* aumentaron cuadráticamente en respuesta a un aumento de la concentración de nutrientes, mientras que en los valores de b^* su respuesta fue directamente proporcional a la concentración de nutrientes.

3.5. Conclusiones

Tras el trabajo explicado anteriormente, se llegó a las siguientes conclusiones:

1. La concentración de nutrientes en la SN influye significativamente en el rendimiento, de forma que una disminución en la concentración de los nutrientes supone una reducción en la biomasa de las plantas, y, por tanto, en la producción final del cultivo. Por lo tanto, el mejor manejo en términos de producción fue el del tratamiento “100% H”.
2. Disminución de la concentración de nutrientes en la SN no produce deficiencias nutricionales en las plantas, debido a que la disminución en el crecimiento produce un efecto de concentración

de nutrientes minerales en el tejido vegetal, enmascarando así el efecto de la baja concentración de nutrientes en la solución nutritiva en el estado nutricional de las plantas. Por lo tanto, la monitorización y control de la composición mineral de la SN podría ser una buena estrategia para gestionar de forma eficiente la SN de los cultivos hidropónicos de raíz flotante.

3. Una alta concentración de N en la SN puede hacer que la concentración de lechugas supere los valores umbrales de nitratos exigidos por la Unión Europea. En nuestro experimento, una concentración de 14 mM N del tratamiento SN “100% H” hizo que las lechugas sobrepasaran en 762,33 mg/kg PF el límite establecido por el Reglamento Europeo. Por lo tanto, la optimización de la SN en este tipo de sistemas debe tener en cuenta tanto el rendimiento agronómico y la calidad de la cosecha como la concentración de nitratos en la parte comestible de las plantas.

4. El tratamiento de “100% H” no solo incrementó la producción, sino que también mejoró la calidad de la cosecha en cuanto al contenido de antocianos, clorofilas (SPAD) y Ca, parámetros que dan valor añadido a la cosecha por su importancia en la dieta humana.

3.6. Referencias bibliográficas

- Alberici, A., Quattrini, E., Penati, M., Martinetti, L., Gallina, P. M., Ferrante, A., y Schiavi, M. (2008). Effect of the reduction of nutrient solution concentration on leafy vegetables quality grown in floating system. *Acta Horticulturae*, 801 PART 2, 1167–1175.
- Callejas, R., Kania, E., Contreras, A., Peppi, C., y Morales, L. (2013). Evaluación de un método no destructivo para estimar las concentraciones de clorofila en hojas de variedades de uva de mesa. *Idesia*, 31(4), 19–26.
- Da Luz, G. L., y Medeiros, P. (2015). The nitrate issue in hydroponic lettuce and the human health. November 2008.
- Fallovo, C., Roupheal, Y., Rea, E., Battistelli, A., y Colla, G. (2009). Nutrient solution concentration and growing season affect yield and quality of *Lactuca sativa* L. var. acephala in floating raft culture. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(10), 1682–1689.
- Hoagland, D., Arnon, D., Hoagland, D. R., Arnon, D. I., y Hutchison, C. B. (1938). The water-culture method for growing plants without soil / THE WATER-CULTURE METHOD FOR GROWING PLANTS WITHOUT SOIL Hoagland 1 Professor of Plant Nutrition and Chemist in the Experiment Station. 2 Instructor in Truck Crops and Junior Plant Physiologist in.
- Hoagland, D. R., y Arnon, D. I. (1950). Preparing the nutrient solution. *The Water-Culture Method for Growing Plants without Soil*, 347, 29–31.
- Kader, A. A. (2008). Flavor quality of fruits and vegetables. 1868 (April), 1863–1868.
- Luna, M., Martínez-Sánchez, A., Selma, M. V., Tudela, J. A., Baixauli, C., & Gil, M. I. (2013). Influence of nutrient solutions in an open-field soilless system on the quality characteristics and shelf life of fresh-cut red and green lettuces (*Lactuca sativa* L.) in different seasons. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 93(2), 415–421.
- Luna, M. C. (2017). Influencia de los Factores Pre y Postcosecha en la Calidad de la Lechuga IV Gama. *Universidad de Murcia*, 281(4), 42.
- Mahlangu, R. I. S., Maboko, M. M., Sivakumar, D., Soundy, P., & Jifon, J. (2016). Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Growth, Yield and Quality Response to Nitrogen Fertilization in a Non-Circulating Hydroponic System. 4167(June), 0–28.
- Maynard, D. N., Barker, A. V., Minott, P. L., y Peck, N. H. (1976). Nitrate accumulation in vegetables. *Advances in Agronomy* 28: 71–118.
- Miller, C. T., Mattson, N. S., & Miller, W. B. (2011). Fertilizer composition, concentration, and

- irrigation method affect growth and development of oxalis regnellii and O. triangularis. HortScience, 46(8), 1110–1115.
- Öztekin, G. B., Uludag, T., & Tüzel, Y. (2018). Growing Spinach in a Floating System With Different Concentrations of Nutrient. 16(3), 3333–3350.
- REGLAMENTO (UE) N. 1258/2011 DE LA COMISIÓN de 2 de diciembre de 2011 que modifica el Reglamento (CE) n. 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de nitratos en los productos alimenticios.
- Rice-Evans, C., y Miller, N. J. (1994). [241 Total antioxidant status in plasma and body fluids. Methods in Enzymology, 234(C), 279–293.
- Sapkota, S., Sapkota, S., & Liu, Z. (2019). Effects of Nutrient Composition and Lettuce Cultivar on Crop Production in Hydroponic Culture.
- Spehia, R. S., Devi, M., Singh, J., Sharma, S., Negi, A., Singh, S., Chauhan, N., Sharma, D., y Sharma, J. C. (2018). Lettuce growth and yield in Hoagland Solution with an organic concoction Lettuce growth and yield in Hoagland Solution with an. International Journal of Vegetable Science, 00(00), 1–10.
- Steele, M. R., Gitelson, A. A., y Rundquist, D. C. (2008). A comparison of two techniques for nondestructive measurement of chlorophyll content in grapevine leaves. Agronomy Journal, 100(3), 779–782.
- Tsouvaltzis, P., Kasampalis, D. S., & Aktsoglou, D. (2020). Effect of Reduced Nitrogen and Supplemented Amino Acids Nutrient Solution on the Nutritional Quality of Baby Green and Red Lettuce Grown in a Floating System.
- Urlić, B., Dumičić, G., Romić, M., & Ban, S. G. (2017). The effect of N and NaCl on growth, yield, and nitrate content of salad rocket (*Eruca sativa* Mill.). Journal of Plant Nutrition, 40(18), 2611–2618.

Capítulo 4:
**Experimento 2. Comparación de dos
sistemas de riego (sistemas flotante y
flujo-reflujo) y optimización de su
manejo en un cultivo hidropónico de
lechuga Batavia**

4. Experimento 2. Comparación de dos sistemas de riego (sistemas flotante y flujo-reflujo) y optimización de su manejo en un cultivo hidropónico de lechuga Batavia

4.1. Introducción

La concentración de oxígeno disuelto en la SN en la que se encuentran sumergidas las raíces de las plantas es uno de los parámetros más importantes para el éxito de un cultivo hidropónico ya que las plantas hortícolas son muy sensibles a condiciones de anoxia e hipoxia. En algunos sistemas hidropónicos, como los que se tratan en este capítulo, la oxigenación de la SN depende del tiempo de recirculación. Frecuencias de recirculación baja pueden afectar a las plantas por la falta de oxígeno, mientras que frecuencias altas pueden hacer que el rendimiento económico sea inaceptable por el gasto energético. Por tanto, es muy importante conocer dentro de cada sistema de riego cual es el mejor manejo de manera que se mantenga niveles correctos de oxígeno disuelto en SN mediante un uso del sistema de una forma energéticamente rentable. En este sentido, en la imagen 4.1 se pueden observar a modo de ejemplo dos lechugas tipo Batavia, de la misma variedad que las de nuestro experimento, en un ensayo preliminar. La lechuga de la izquierda sufrió problemas de oxigenación en la SN, dando lugar a síntomas de pardeamiento muy acusado, poco volumen en la raíz, y una disminución de la parte aérea; mientras que la lechuga de la derecha, que no sufrió anoxia, está en perfectas condiciones.



Imagen 4.1. Detalle de raíz de lechugas tipo Batavia. Comparativa de dos lechugas, una con problemas en raíz por mala oxigenación y otra con raíz bien oxigenada (izquierda) y raíces con graves problemas en raíz por mala oxigenación (derecha).

En este contexto, se realizó este ensayo, para un cultivo de lechuga Batavia verde en un sistema hidropónico a raíz desnuda, con un doble objetivo: determinar cuál es el mejor sistema de riego de entre los dos propuestos (sistema flujo-reflujo -FR- y sistema flotante -SF-) y definir la mejor forma de manejar los intervalos de riego en cada uno de los sistemas. Para este experimento se diseñaron tres manejos diferentes de los intervalos de riego para el sistema de

riego FR y otros tres manejos diferentes de los intervalos de riego para el SF. Los tratamientos para el sistema FR consistieron en: i) llenado y vaciado de la SN de la mesa de cultivo (5 minutos), dejando la mesa totalmente vacía y las raíces al aire durante 15 minutos “FR15” (FR); ii) llenado y vaciado de la SN de la mesa de cultivo (5 minutos), dejando la mesa totalmente vacía y las raíces al aire durante 20 minutos “FR20” (FR); iii) llenado y vaciado de la SN de la mesa de cultivo (5 minutos), dejando la mesa totalmente vacía y las raíces al aire durante 25 minutos “FR25” (FR). Para el sistema flotante (SF) se ensayaron los siguientes manejos: i) mesa siempre llena de SN y recirculación de SN durante 1 minuto cada 15 minutos, “SF01” (SF); ii) mesa siempre llena de SN y recirculación de SN durante 5 minutos cada 15 minutos, “SF05” (SF) y iii) mesa siempre llena de SN y recirculación de SN durante 10 minutos cada 15 minutos, “SF10” (SF).

4.2. Material y métodos

4.2.1. Material vegetal

Para el desarrollo de este ensayo se escogió el cultivar de lechuga Batavia verde (var. Lettony). Se eligió esta variedad comercial debido a que, en pruebas preliminares, resultaron de crecimiento muy rápido en cultivo hidropónico. Además, son cultivares muy apreciados por los consumidores en la elaboración de ensaladas.

4.2.2. Descripción de las instalaciones

La descripción de las instalaciones en las que se llevó a cabo este experimento 2 (invernadero, cámara de germinación, cabezal de riego y sistema de cultivo empleado) se pueden consultar en el apartado 3.2.2. *Descripción de las instalaciones* del experimento 1 de la presente memoria.

Sistemas de riego empleados: sistema flotante y sistema flujo-reflujo.

Para el desarrollo de este experimento se emplearon dos sistemas de riego: el sistema flotante y el sistema flujo-reflujo. La descripción del sistema de riego flotante se puede consultar en el apartado 3.2.2. *Descripción de las instalaciones* del experimento 1 de la presente memoria. Por otro lado, el sistema flujo-reflujo (ebb and flow) es una técnica de manejo del aporte de SN ampliamente empleada en las diferentes modalidades de sistemas de cultivo hidropónico y de cultivo en maceta. Su uso consiste en la inundación momentánea con SN de la zona radicular del cultivo. La SN es posteriormente drenada y recuperada en un depósito. De esta forma, se produce una alternancia de periodos en los que la zona radicular está totalmente inmersa en SN con periodos en los que las raíces deben sobrevivir gracias a la humedad resultante del periodo anterior. En la Imagen 4.2 se muestran los dos momentos clave de este sistema de riego:

inundación de la mesa con SN de manera que las raíces queden sumergidas (izquierda) y mesa después del drenaje de la SN de manera que las raíces quedan al aire (derecha).



Imagen 4.2. Sistema Flujo-Reflujo: mesa inundada de SN (izquierda) y mesa vacía tras drenaje de SN (derecha).

4.2.3. Software para el manejo del cultivo

El software empleado para el manejo del cultivo fue el mismo que el usado en el experimento 1, por lo que se puede consultar en el apartado 3.2.3. *Software para el manejo del cultivo* de la presente memoria.

4.2.4. Operaciones de cultivo

La descripción de las operaciones de cultivo realizadas en este experimento 2 (germinación, desarrollo de plántulas y crecimiento de las raíces, trasplante definitivo a sistemas de cultivo hidropónico) se pueden consultar en el apartado 3.2.4. *Operaciones de cultivo* del experimento 1 de la presente memoria. En la imagen 4.3 se puede observar la escasa raíz que tienen las plantas después de la germinación, por lo que es necesario favorecer su crecimiento antes de llevar a cabo el trasplante definitivo de las lechugas al sistema de cultivo:

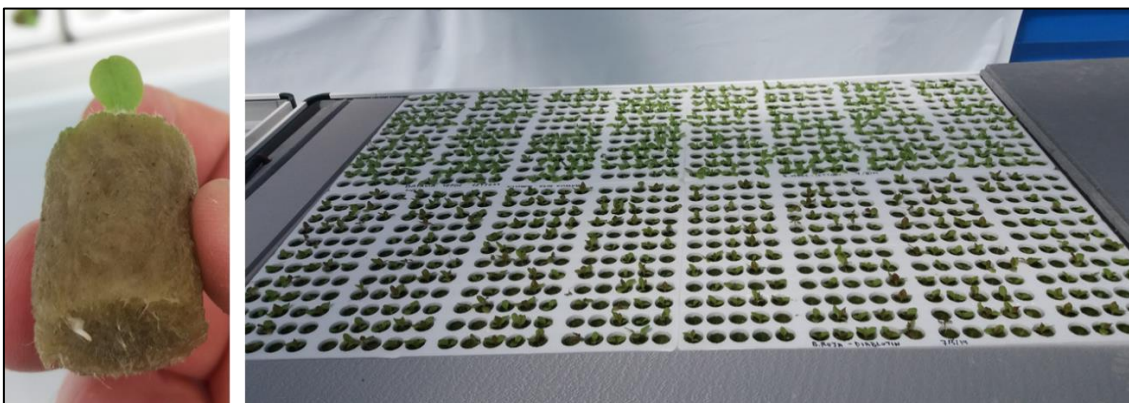


Imagen 4.3. Detalle de raíz de plántula a los 7 DDG (izquierda). Antes del trasplante definitivo se requiere un desarrollo de la raíz de hasta 8 cm de largo que se conseguirá en la operación de cultivo “desarrollo de plántulas y crecimiento de raíces” (derecha)

Solución nutritiva y su manejo durante el cultivo

La solución nutritiva usada en el ensayo se puede consultar en la tabla 3.1 y tabla 3.2 del apartado 3.2.4. *Operaciones de cultivo* del experimento 1 de la presente memoria.

4.2.5. Diseño experimental

Se llevó a cabo un experimento en mesas de cultivo hidropónico con lechuga tipo Batavia para conocer su comportamiento agronómico en dos sistemas de riego: sistema flotante y sistema flujo-reflujo. En cada uno de estos sistemas se ensayaron 3 manejos, basados en la variación de la periodicidad de recirculación de la SN que llegaba a las raíces de las plantas. Estos diferentes intervalos de tiempo se consiguieron mediante la programación de las bombas de riego de cada mesa. Por tanto, en total se dispusieron seis tratamientos (2 sistemas x 3 manejos), tal y como se puede observar en la tabla 4.1:

Tabla 4.1. Tiempo de recirculación por ciclo y tiempo entre ciclos de los distintos tratamientos del ensayo realizado en Batavia Verde bajo dos sistemas de cultivo hidropónico.

TRATAMIENTO	SISTEMA DE RIEGO	FUNCIONAMIENTO BOMBA	
		BOMBA ON (min)	BOMBA OFF (min)
FR15	Flujo-Reflujo	5	15
FR20	Flujo-Reflujo	5	20
FR25	Flujo-Reflujo	5	25
SF01	Sistema Flotante	1	15
SF05	Sistema Flotante	5	15
SF10	Sistema Flotante	10	15

Se estudió cómo estos tratamientos afectaron al oxígeno disuelto en la SN y, por tanto, como afectaron al cultivo en cuanto a parámetros productivos (rendimientos, peso fresco, contenido en materia seca, área foliar) y a parámetros de calidad (textura, color, clorofilas y estado nutricional), así como parámetros de intercambio gaseoso. De esta forma, se pretendió determinar, para el material vegetal escogido y en las condiciones que se dieron durante el ensayo, cual fue el mejor sistema de cultivo y dentro de cada sistema de cultivo cual fue el tiempo óptimo de intervalo de riego.

Para llevar a cabo el experimento, se utilizaron seis mesas de cultivo hidropónico, una por tratamiento propuesto. El número de plantas utilizado fue de 240 plantas, repartidas en las seis mesas a razón de 40 plantas por tratamiento. La densidad fue de 16 lechuga/m². En los muestreos intermedio realizados se volvieron a agrupar las lechugas para mantener la densidad inicial.

En la figura 3.1 y la imagen 4.4 se puede observar cómo quedó el diseño experimental:

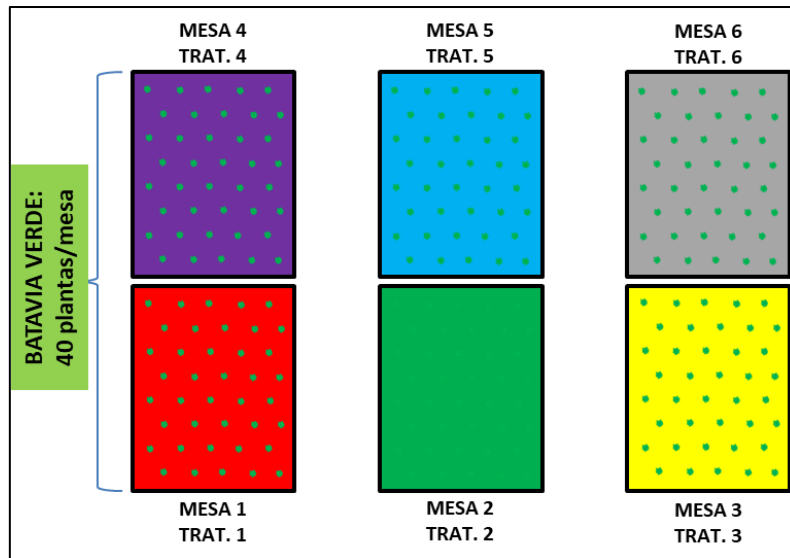


Figura 4.1. Diseño experimental del ensayo: flujo-reflujo (mesas 1, 2 y 3) y sistema flotante (mesas 4, 5 y 6)



Imagen 4.4. Disposición de las dos variedades de lechuga y Tratamientos.

Una vez germinadas las plantas, estas se pusieron en bandejas en las mesas de cultivo para favorecer el desarrollo de la planta y el crecimiento de la raíz. A los 11 DDG se produjo el trasplante definitivo de las plantas en su lugar en las mesas de cultivo. En un primer momento no se aplicaron los tratamientos, puesto que las plantas eran demasiado pequeñas y el sistema de riego flujo-reflujo puede conllevar problemas en volúmenes tan pequeños de raíz, por lo que a todas las mesas de cultivo se les impuso un riego con sistema flotante poco restrictivo (recirculación de SN durante 5 minutos cada 15 minutos). A los 16 DDG se pusieron en marcha los tratamientos tal y como se expone la tabla 4.1 del presente apartado, considerando este día como el primer día después del trasplante (1 DDT).

A los diecisiete días de haber puesto en marcha los tratamientos (17 DDT) se realizó una cosecha en la que se realizaron las siguientes determinaciones: peso fresco (g) de parte aérea, peso fresco (g) de raíz y se tomaron muestras para el análisis nutricional: una parte de las hojas y la totalidad de la raíz de cada lechuga muestreada fueron introducidas en sobres de papel-cartón convenientemente etiquetados que se colocaron durante 72 horas en una estufa de aire forzado a 70 °C para la posterior determinación del contenido en materia seca y el análisis nutricional en laboratorio. En cada mesa quedaron 35 plantas para seguir desarrollando el experimento, que se agruparon para seguir manteniendo la densidad de cultivo inicial.

Veintitrés días después de haber puesto en marcha los tratamientos se realizó una segunda cosecha midiendo los parámetros comentados en el apartado siguiente (4.2.6. *Determinaciones*). Además, una parte de las hojas de las plantas de cada lechuga muestreada se envolvieron en papel de aluminio y se sumergieron en nitrógeno líquido para posteriormente medir en laboratorio la capacidad antioxidante. También se realizó en el resto de las plantas la medición de clorofilas (unidades SPAD) y de los parámetros fotosintéticos de las plantas.

Durante el desarrollo del experimento, las ventanas del techo se mantuvieron siempre cerradas. El sistema de refrigeración consistió en un sistema de evaporación de agua "air-cooling" y un sistema de extracción activa de aire compuesto por cuatro ventiladores-extractores de tipo axial helicoidal (38.000 m³.h⁻¹ por extractor). El punto de ajuste de la temperatura interna para la activación de los extractores fue de 20 °C. Mientras el sistema de ventiladores-extractores estaban encendidos, los dos ventiladores-removedores ubicados en el techo removían el aire interno del invernadero contribuyendo a la homogeneidad de temperaturas dentro del módulo.

La temperatura media diurna y nocturna fue respectivamente de 23 y 18 °C, medidas con un transmisor de temperatura fijo "DPF160".

Durante la realización, y tal y como se explica en el apartado 3.2.4. *Operaciones de cultivo* de la presente memoria, se procedió a la determinación de los parámetros pH, conductividad eléctrica, T^a y oxígeno disuelto de la SN; y semanalmente se desinfectó la SN y se procedió al reequilibrio nutricional de la misma.

4.2.6. Determinaciones

Determinación de oxígeno disuelto en mesas

La concentración de oxígeno disuelto en la SN a nivel de mesa (SN que está entra en contacto con las raíces de las lechugas) se midió con un dispositivo "Hach HQ40d", a lo largo de todo el ciclo de cultivo en 0 DDT, 4 DDT, 7 DDT, 10 DDT, 15 DDT, 18 DDT y 25 DDT. En el sistema flotante se midió en los tres manejos propuestos, tanto en los periodos en lo que se estaba

aportando SN a la mesa (*Situación más favorable*) como en los periodos en los que la bomba de riego se encontraba en reposo (*Situación más desfavorable*). Este momento de reposo (no había aportación de SN del depósito de riego a las plantas) fue el más crítico desde el punto de vista de la respiración de las raíces y se eligió para la medición el momento justo anterior a la puesta en funcionamiento de la bomba y el consiguiente aporte de nueva SN. Para cada situación se hicieron cuatro mediciones, cada una de ellas en un punto determinado de la mesa para lograr un resultado final homogéneo de toda la mesa de cultivo y siempre repitiendo este mismo patrón de medición, dando el valor final como el promedio de las cuatro mediciones. Las mediciones se realizaron aprovechando unos orificios realizados en las bandejas, de manera que el acto de medir no produjera una oxigenación no deseada de la SN por el movimiento de las raíces que pudiera perturbar los resultados obtenidos.

Determinaciones de parámetros de producción

Se midieron los parámetros productivos peso fresco (g/planta), rendimiento productivo (g/m²), longitud de tallo (cm/planta), materia seca (g ms/planta) y contenido relativo de agua (%) en una cosecha final realizada a los 23 DDT, empleando 5 lechugas por tratamiento. Los protocolos seguidos para la determinación de estos parámetros y de la evolución del crecimiento de las lechugas fueron los mismos que se realizaron para el experimento 1, tal y como se expone en el epígrafe 3.2.6. *Determinaciones* de la presente tesis. Para la medición del área foliar específica (cm²/g PS) se tomó una muestra representativa de la parte aérea que fue pesada en una balanza de precisión (RADWAG WLC 2/A2, Varsovia, Polonia). Las hojas pesadas se separaron y midieron con un medidor de área (LI-COR LI-3100c AREA METER, Nebraska, EEUU). Con el dato del área foliar se midió el área foliar específica (AFS) que representa el área de la hoja en relación a su peso, en nuestro caso usando el peso seco, y calculada según la fórmula de Stanghellini y col. (2019). Los resultados se expresaron en cm²/g PS y son la media ± ES de todas las medidas realizadas en cada uno de los tratamientos.

$$AFS = \frac{\text{área foliar (cm}^2\text{)}}{\text{peso (g)}}$$

En la imagen 4.5 se puede observar un momento de la medición de longitud de tallo y de área foliar durante el experimento:



Imagen 4.5. Medición de longitud de tallo y área foliar durante el experimento.

Determinación de análisis nutricional

El análisis nutricional (mg/100 mg PS de los macronutrientes y mg/kg PS de los micronutrientes) se realizó en dos muestreos (el primero a los 17 DDT y el segundo al final a los 23 DDT), usando 5 lechugas por tratamiento, tanto para la parte aérea como para la raíz. Los protocolos llevados a cabo en laboratorio para su determinación son los mismos que se emplearon en el experimento 1 (se pueden consultar en el apartado 3.2.6. *Determinaciones* de la presente memoria).

Determinación de parámetros de calidad

Color y clorofilas (uds. SPAD) se midieron en el muestreo realizado a los 23 DDT. Para determinar los parámetros de color se utilizaron 5 lechugas a razón de 6 medidas por lechuga, tres en hojas externas y tres en hojas internas, seleccionando hojas sanas, sin síntomas de clorosis ni daños, tomando las medidas en la parte superior de la hoja sin nervaduras. Para la determinación de las clorofilas (uds. SPAD) se utilizaron 5 lechugas por tratamiento. Los protocolos seguidos se pueden consultar en el apartado 3.2.6. *Determinaciones* de la presente tesis.

La textura (Imagen 4.6) de hoja se determinó usando un analizador de textura (TA.XT.plus Texture Analyser, Stable Micro Systems, Londres, Reino Unido) con una célula de carga de 294,2 N (30 kg) a la que se acopló una célula Kramer de cinco cuchillas (HDP/KS5). Esta célula simula el proceso de masticación en tres pasos consecutivos, compresión, cizalladura y extrusión. Se analizaron 5 lechugas por tratamiento, realizándose 6 determinaciones por lechuga, tres en hojas externas y tres en hojas internas. Todas las mediciones se realizaron inmediatamente después de la cosecha a 10 °C de temperatura para paliar la posible deshidratación. Se colocó un trozo de hoja, recién cortado y sin nervadura ni daños aparentes, en el porta muestras (dimensiones 82×63×89 mm), y se forzó el corte de la hoja con cinco cuchillas (1,5 mm de grosor). La fuerza máxima (N) necesaria para cortar la hoja se registró en el software Texture Expert. Los resultados

se expresan en Newton (N) y son la media $\pm$ ES de todas las medidas realizadas en cada uno de los tratamientos.

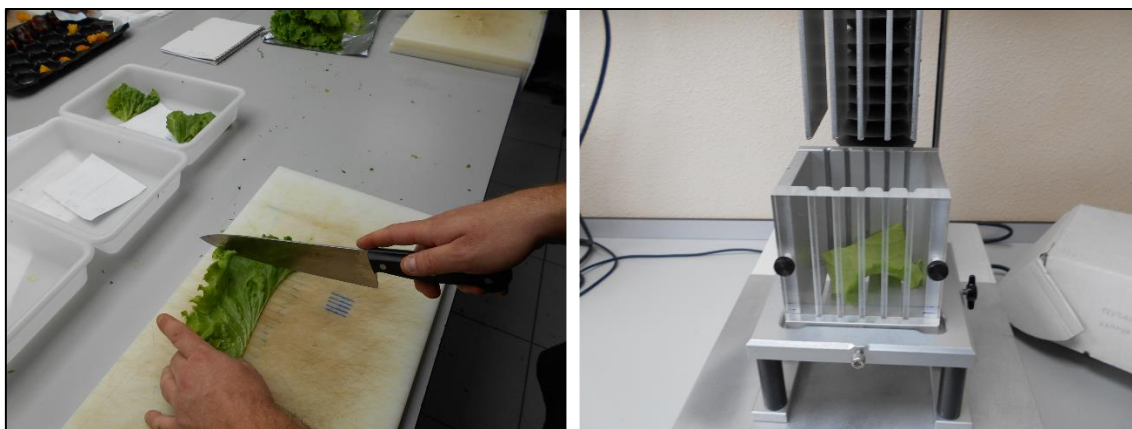


Imagen 4.6. Preparación de muestra y medición de textura de hoja en TA. XT.plus Texture Analyser

Determinaciones bioquímicas

Peroxidación lipídica.

La peroxidación lipídica se determinó utilizando malondialdehído (MDA), el cual es un producto de la peroxidación de los lípidos de membrana. Se utilizó el mismo extracto de hoja que para la determinación del peróxido de hidrógeno siguiendo el procedimiento descrito por Gomes-Junior y col. (2006). La reacción constó de 62,5 μ L de extracto de hoja y 250 μ L de TBA 0,5% disuelto en TCA 20%. Las muestras fueron incubadas a 95 °C durante 20 minutos. Por último, la absorbancia fue medida en el espectrofotómetro (PowerWave, modelo XS2. BioTek, Winooski, Estados Unidos) a 535 nm y 600 nm en una placa de espectro visible. La absorbancia a 600 nm se usó para corregir la turbidez inespecífica que se da a 535 nm.

Concentración de peróxido de hidrógeno.

Para la determinación de la concentración de peróxido de hidrógeno se siguió el protocolo de Yang y col. (2007): 0,1 g de hoja de lechuga previamente congelada fue pulverizada en un mortero con nitrógeno líquido y homogeneizada con 0,5 mL de TCA al 0.1%. El producto del paso anterior fue centrifugado a 12.000 g durante 5 minutos. Se homogeneizaron con 100 μ L de buffer fosfato potásico 100 mM a pH 7,0, al que se añadió 500 μ L de yoduro potásico 1 M y 300 μ L de agua, alcanzando así un volumen final de 1 mL. Las muestras fueron incubadas en oscuridad durante 40 minutos y se midieron en un espectrofotómetro microplaca (PowerWave, modelo XS2. BioTek, Winooski, Estados Unidos) a una longitud de onda de 390 nm en una placa de espectro visible provista de 96 pocillos. Las absorbancias se compararon con una curva patrón de H₂O₂, usando un estándar de peróxido de hidrogeno de 10-250 μ mol.

DPPH.

Para la determinación de la capacidad antioxidante mediante DPPH se siguió el procedimiento establecido por Koleva y col. (2020). En primer lugar, se procedió a realizar una extracción de la muestra congelada. Se machacó la muestra con mortero en Nitrógeno líquido, se pesó 0,2 g de material vegetal en un eppendorf de 5 ml y se añadieron 0,5 ml de metanol al 80%. En cada eppendorf, se introdujeron cinco bolas magnéticas y se volvió a homogeneizar la muestra en micromortero (Bullet Blender, modelo 5 Gold. Next Advance, Troy, Estados Unidos) durante un minuto a 4 °C. Una vez acabado el homogeneizado y extraídas las cinco bolas magnéticas se procedió a pasar el sobrenadante a otro eppendorf, que fue centrifugado a 12.000 rpm durante 10 minutos a 4 °C (Centrifugadora Microfuge 22R. Beckman Coulter, Inc., Nyon, Suiza).

Para la determinación de la capacidad antioxidante se usó DPPH pesando 0,0019 g y disolviéndolo en 25 mL. En una placa de micropocillos se introdujeron de 10 µL de sobrenadante y se adicionó a cada pocillo el volumen restante de DPPH hasta completar 200 µL en total. Se llenó la placa con sus respectivos blancos formados por DPPH y Metanol al 80% y se midió la absorbancia a T0 y T30 minutos a 517 nm en un espectrofotómetro (PowerWave, modelo XS2. BioTek, Winooski, Estados Unidos) conservando durante este tiempo la placa en oscuridad.

Determinación de parámetros de intercambio gaseoso

Los distintos parámetros fotosintéticos (asimilación neta de CO₂, transpiración foliar, conductancia estomática, concentración de CO₂ subestomático y eficiencia del uso del agua) se midieron en la cosecha final del experimento (23 DDT) en 5 lechugas por tratamiento, tal y como se puede observar en la Imagen 4.7. Se determinaron sobre una hoja media, y totalmente expandida. Para estas determinaciones se utilizó un analizador portátil de gases (PP System CIRAS2, UK) que fue configurado para el mantenimiento constante de la luz (PAR: 1.000 µmol/m²·s) y la concentración de CO₂ (400 ppm).



Imagen 4.7. Medición de parámetros de intercambio gaseoso

4.2.7. Tratamiento estadístico de datos

Se utilizó el software Microsoft Excel 2016 (Microsoft, Washington, EEUU) para la gestión y tratamiento de datos, cálculo de valores medios, error estándar “ES”. Para la representación gráfica de resultados se utilizó SIGMAPLOT 14.5 (SYSTAT). Para el análisis estadístico, se utilizó el software Statistical Package for the Social Sciences 26 (SPSS) (IBM, New York, EEUU). Se determinó la existencia de la distribución normal en los datos por la prueba de normalidad según Shapiro-Wilk para tamaños de muestra (n) inferiores a 50 ($n < 50$) y según Kolmogorov-Smirnov para $n > 50$. Se determinó la homogeneidad de las varianzas por el estadístico de Levene. Se realizó una prueba t de Student y un análisis ANOVA, con la prueba post-hoc de Duncan para la determinación de diferencias significativas entre tratamientos y de los subconjuntos, estableciéndose como diferencias significativas para $0,05 > p > 0,01$ y muy significativas para $p < 0,01$, y sin diferencias significativas (ns) para $p > 0,05$.

4.3. Resultados

4.3.1. Oxígeno disuelto y temperatura en la SN en mesas

En estos sistemas ensayados, sistema flotante y sistema flujo-reflujo, uno de los factores limitantes que pueden tener efectos negativos en las plantas es la concentración de oxígeno disuelta en la solución nutritiva. Si esta concentración es muy baja las plantas pueden sufrir hipoxia e incluso anoxia, causando alteraciones en su crecimiento, y, en casos graves, incluso pueden llegar a morir. Por lo tanto, durante el desarrollo del ensayo se midió la concentración de oxígeno de la solución nutritiva en los dos sistemas, SF y FR, en cada uno de sus tres tratamientos, tal y como queda reflejado en la Figura 4.2.

En el sistema flotante, en su estado más favorable (bomba funcionando) (Fig. 4.2A) se empezó a observar diferencias significativas entre tratamientos a los 7 días después del trasplante (DDT). En esta situación, la concentración de oxígeno fue similar para el manejo SF05 y SF010, siendo estos valores más altos que para los del tratamiento SF01. Desde el día en el que se observaron diferencias significativas (DDT7) hasta el final del ensayo (DDT25) los valores de la concentración de oxígeno se mantuvieron estable en cada uno de los manejos, dándose siempre estas diferencias entre los tratamientos. En el caso de la situación más desfavorable (bomba parada), las diferencias entre tratamientos empezaron desde el 10 DDT, incrementando la concentración de oxígeno conforme se aumentaba el tiempo en el que se ponía en marcha la recirculación $SF10 > SF5 > SF1$ (Fig. 4.2B). A diferencia del caso anterior, estos niveles disminuyeron progresivamente con el tiempo para los tres tratamientos.

En el sistema flujo-reflujo (Fig. 4.2C), en cualquier día de toma de medidas no se observaron diferencias para los tres tratamientos ensayados FR15, FR20, y, FR25, manteniendo una concentración estable de 8 mg/L.

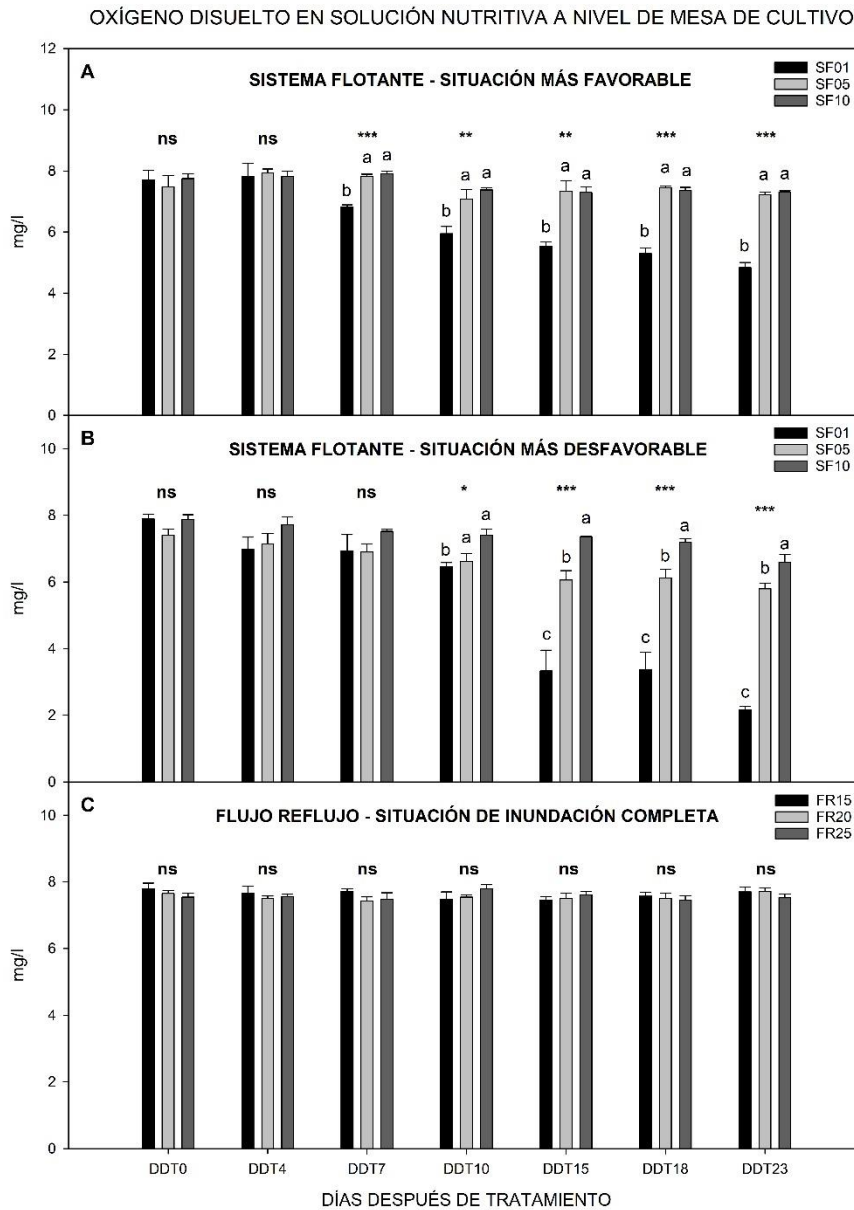


Figura 4.2. Concentración de oxígeno disuelto (mg/l) en la SN de mesas de cultivo (nivel radicular): (A) Situación más favorable en SF para SF01, SF05 y SF10; (B) Situación más desfavorable en SF para SF01, SF05 y SF10; (C) Situación de mesa totalmente inundada en FR para FR15, FR20 y FR25. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=4$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0.05$ en cada uno de los días de muestreo, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

En estos sistemas, otro de los factores que puede variar como consecuencia de los diferentes manejos es la temperatura de la SN que está en contacto con las raíces de las lechugas (tabla 4.2), por lo que se decidió a controlar también este parámetro. Los datos muestran que no existieron diferencias significativas entre los tres manejos propuestos en el sistema de riego de FR puesto que las diferencias del manejo no supusieron cambios en el tiempo que la SN nutritiva estaba en la mesa y sí en el tiempo que las raíces estaban al aire. En cambio, el sistema flotante

supuso diferentes periodos de recirculación, de tal que a mayor tiempo que estuvo la SN estancada en la mesa mayor fue la temperatura como así muestran los datos registrados en este sistema. SF01 obtuvo las temperaturas más altas de SN en todos los días en los que se procedió al muestro, que supuso un incremento significativo con respecto la temperatura registrada en SF05 y SF10.

Tabla 4.2. Temperatura (°C) de SN en las mesas de cultivo (nivel radicular): para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10. Fueron comparados los manejos dentro de cada sistema de riego en 0, 4, 7, 10, 15, 18 y 23 DDT.

SISTEMA	TRAT.	Tª (°C) 0 DDT	Tª (°C) 4 DDT	Tª (°C) 7 DDT	Tª (°C) 10 DDT	Tª (°C) 15 DDT	Tª (°C) 18 DDT	Tª (°C) 23 DDT
FR	FR15	20,80	20,53	22,88	25,58	25,23	24,13	25,70
	FR20	21,13	20,40	23,25	25,60	25,58	24,33	25,83
	FR25	20,83	20,80	22,83	25,70	26,03	24,20	25,70
	ANOVA FR	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SF	SF01	22,25 a	22,73 a	23,38 a	25,70 a	26,15 a	26,95 a	26,73 a
	SF05	21,48 b	21,33 b	22,88 b	25,15 ab	25,23 b	25,58 b	25,88 b
	SF10	20,58 c	20,73 c	21,83 c	24,45 b	24,83 c	24,70 c	24,53 c
	ANOVA SF	***	***	***	*	***	***	***

Los datos representan las medias con $n=4$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que * y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$ en cada uno de los días de muestreo, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

4.3.2. Parámetros productivos

Biomasa y rendimiento productivo

En la figura 4.3 se pueden observar los parámetros del rendimiento del cultivo, peso fresco de parte aérea (Fig. 4.3A) y rendimiento por unidad de superficie (Fig. 4.3B) de la cosecha realizada al final del experimento. En el sistema flujo-reflujo, se dieron diferencias significativas entre tratamientos, siendo el peso fresco/planta y el rendimiento por superficie mayor en con el manejo “FR20”, que obtuvo 433,71 g/planta y 3.469,68 g/m², aunque sin diferencias significativas con respecto al manejo “FR25”. Así, el tratamiento “FR20” incrementó el peso fresco de las lechugas y el rendimiento un 10,17 % con respecto al “FR15”, que obtuvo valores de 393,68 g/planta y 3149,44 g/m², respectivamente.

En el sistema flotante, como en el caso anterior, hubo diferencias entre tratamientos, siendo las plantas del tratamiento “SF10” las que dieron el mayor peso fresco y rendimiento (310,21 g/planta y 2481,65 g/m²), aunque estos valores no fueron significativos con respecto a las del tratamiento SF05. Así, el tratamiento “SF10” incrementó un 13,42 % estos parámetros con respecto al tratamiento “SF01”. De los dos sistemas estudiados, el sistema FR con los manejos “FR20” y “FR25” son los que obtuvieron un mayor peso fresco por pieza y, por tanto, un mayor rendimiento agronómico.

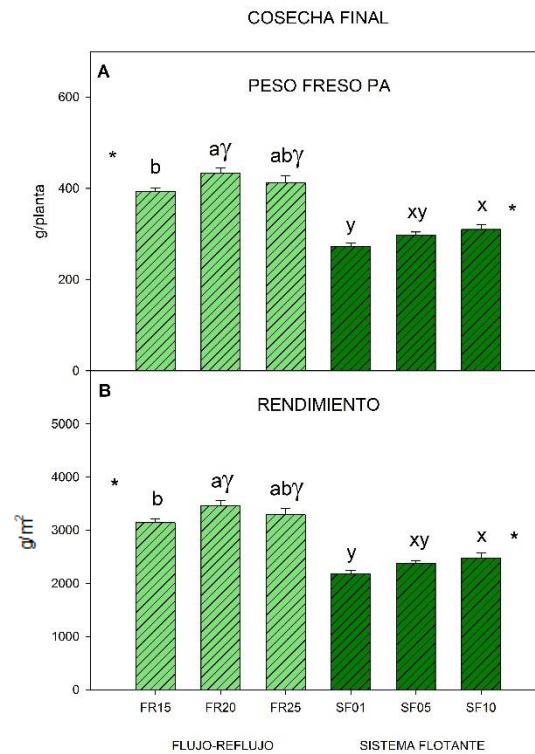


Figura 4.3. Peso fresco (A) de la parte aérea y rendimientos (B) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en la cosecha final. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. * indica significancia con $0.1 > P \geq 0.01$. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a y b para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

Parámetros de crecimiento vegetativo: longitud de tallo, peso fresco raíz, materia seca y contenido relativo de agua de la parte aérea y la raíz.

Los valores de longitud del tallo, materia seca y contenido de agua de la parte aérea por planta obtenidos en la cosecha final se pueden ver en la tabla 4.3. En el sistema flujo-reflujo (FR) solamente se ven diferencias significativas entre tratamientos en la longitud del tallo, siendo las plantas del tratamiento FR20 las que dieron el valor más alto (6,28 cm/planta), aunque este no fue significativo con respecto a las de las plantas FR15 (tabla 4.3).

En el sistema flotante, se dieron diferencias significativas entre tratamientos en los tres parámetros analizados. Así, las plantas del tratamiento SF01 tendieron a tener la mayor longitud del tallo y materia seca de la parte aérea y el menor contenido de agua que el resto de tratamientos, aunque en los dos primeros parámetros no se dieron diferencias significativas con respecto a las plantas del tratamiento SF10.

Al comparar todos los sistemas estudiados en su conjunto, se observó que el sistema FR, con los manejos “FR15” y “FR20”, fue el que mayor longitud de tallo obtuvieron. En cuanto al contenido relativo en agua de parte aérea, todos los manejos fueron significativamente iguales entre si y superiores a “SF01”.

Tabla 4.3. Longitud de tallo (cm/planta), materia seca de PA (g ms/planta), y contenido relativo de agua de PA (%) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en la cosecha final.

SISTEMA	TRATAMIENTO	Longitud tallo (cm/planta)	Materia seca PA (g ms/planta)	CRA PA (%)
FR	FR15	5,82 ab γ	14,32 γ	96,35 γ
	FR20	6,28 a γ	15,08 γ	96,53 γ
	FR25	5,44 b	16,25 γ	96,06 γ
	ANOVA FR	*	ns	ns
SF	SF01	5,66 x	14,06 x γ	95,45 y
	SF05	5,06 y	10,57 y	96,46 x γ
	SF10	5,54 xy	11,30 y	95,89 xy γ
	ANOVA FR	*	**	**

Los datos representan las medias con $n=5$. ns indica no significancia $P \geq 0.1$, mientras que * y ** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$ y $0.01 > P \geq 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a y b para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

En la tabla 4.4 se muestran los valores del peso fresco, materia seca y contenido relativo de agua de la raíz para cada uno de los sistemas y tratamientos ensayados. En el sistema flujo-reflujo se dieron diferencias significativas entre tratamientos en el peso fresco de la raíz y el contenido relativo de agua. En el peso fresco de la raíz las plantas del tratamiento FR25 tuvieron el valor más alto (62,53 g/planta), seguida de las plantas FR20 y FR15. En el contenido relativo de agua las plantas del tratamiento FR25 tuvieron un valor más alto que aquellas del tratamiento FR15.

En el sistema flotante también se dieron diferencias significativas entre tratamientos en el peso fresco y el contenido de agua de la raíz. En el primer parámetro, las plantas del tratamiento SF05 tuvieron un mayor valor que las del tratamiento SF01; mientras, en el contenido de agua de la raíz, las plantas del tratamiento SF05 tuvieron un valor más alto que aquellas procedentes de los otros dos tratamientos, en los que no hubo diferencias entre ellos.

Al analizar los dos sistemas en su conjunto se observó como el tratamiento de FR “FR25” fue el que mayor peso fresco de raíz alcanzó. En cuanto al contenido de materia seca en raíz por planta, todos los tratamientos del FR fueron significativamente superiores a aquellos del SF, mientras que “SF01” y “SF05” fueron los que mayor contenido en agua en raíz obtuvieron.

Tabla 4.4. Peso fresco de R (g/raíz), materia seca de R (g ms/raíz) y contenido relativo de agua de R (%) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en la cosecha final.

SISTEMA	TRATAMIENTO	PESO FRESCO RAÍZ (g/raíz)	Materia seca RAÍZ (g ms/raíz)	CRA RAÍZ (%)
FR	FR15	46,61 c	2,04 γ	95,65 b
	FR20	54,83 b	2,05 γ	96,30 ab
	FR25	62,53 a γ	2,26 γ	96,40 a
	ANOVA FR	**	ns	*
SF	SF01	43,90 y	1,56	96,44 y
	SF05	51,02 x	1,52	97,03 x γ
	SF10	48,38 xy	1,72	96,44 y
	ANOVA FR	*	ns	**

Los datos representan las medias con $n=5$. ns indica no significancia $P \geq 0.1$, mientras que * y ** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$ y $0.01 > P \geq 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a, b, c para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

Área foliar específica.

El área específica nos da la relación entre la superficie y el peso fresco de las lechugas. Estos datos se pueden ver en la figura 4.4. En el caso de las plantas del sistema flujo-reflujo no se dieron diferencias entre tratamientos, teniendo las plantas una media de 380 $\text{cm}^2/\text{g PS}$. En las plantas del sistema flotante, aquellas procedentes del tratamiento SF05 tuvieron un valor significativamente mayor (441,39 cm^2/g) con respecto a los otros dos tratamientos, en los que no se vieron diferencias significativas entre ellos. Al estudiar los seis tratamientos juntos, se observó que cuatro de ellos, “FR15”, “FR20”, “SF05” y “SF10”, fueron significativamente superiores a “FR25” y “SF01”.

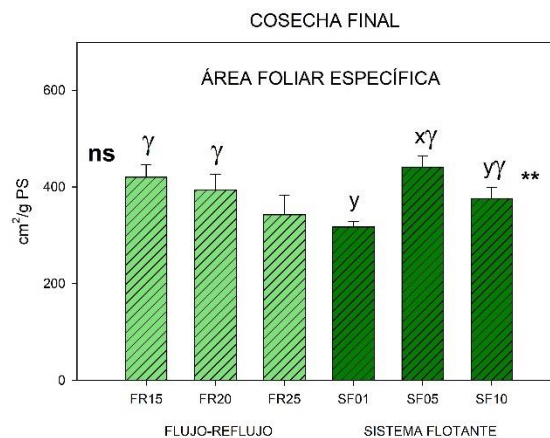


Figura 4.4. Área foliar específica ($\text{cm}^2/\text{g PS}$) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en cosecha final. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que ** indica diferencia significativa con $0.01 > P \geq 0.001$. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

Evolución crecimiento lechuga.

A lo largo del experimento se estudió cómo evolucionó el peso fresco de las lechugas con el tiempo en los dos sistemas de cultivo y en cada uno de los tratamientos, tal y como se puede ver en la figura 4.4. En todos los tratamientos las lechugas fueron ganando peso de forma exponencial, siendo en el periodo entre 17 DDT y 23 DDT en el que más peso adquirieron. En los muestreos de los días 0 DDT, 10 DDT, y 17 DDT no hubo diferencias ni entre los sistemas ni entre los diferentes manejos dentro de cada sistema. Las diferencias entre tratamientos se dieron al final del desarrollo del cultivo, tal y como se ha comentado anteriormente.

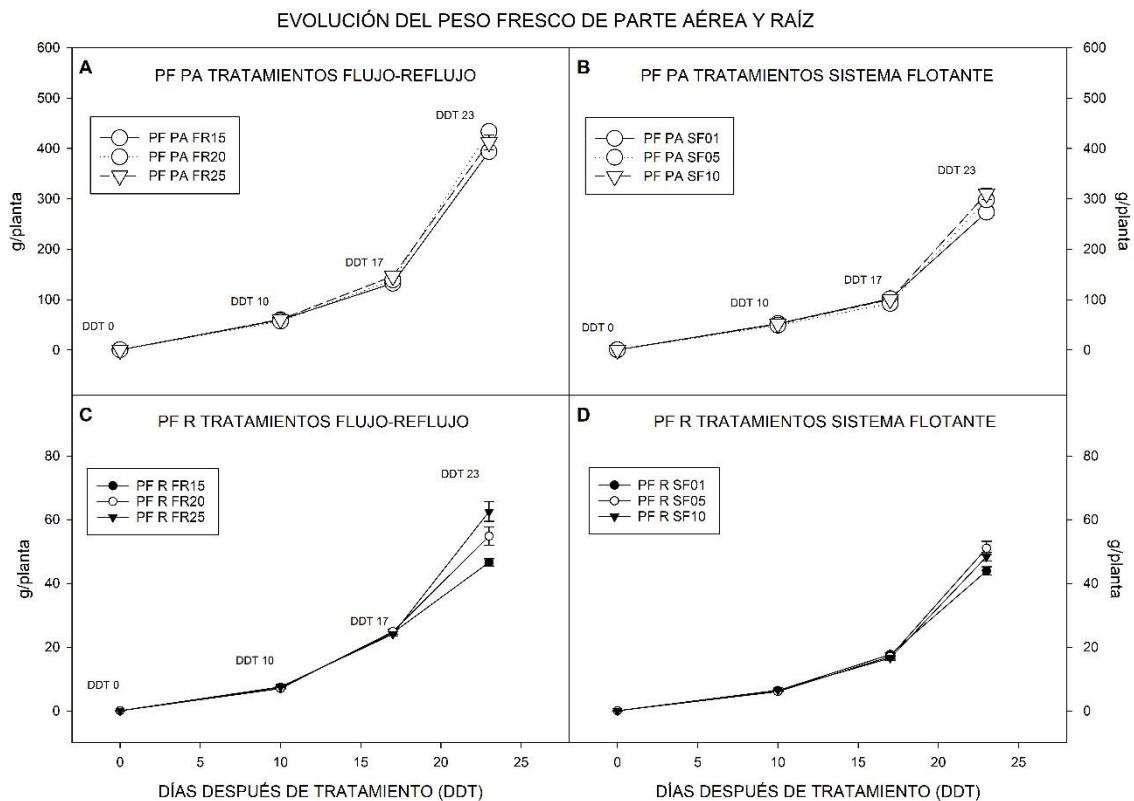


Figura 4.5. Evolución del peso fresco (g/planta) de la parte aérea y de la raíz para (A y C) FR (FR15, FR20 y FR25) y (B y D) SF (SF01, SF05 y SF10). Las medidas fueron tomadas en los DDT 0, 10, 17 y 23. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$.

4.3.3. Estado nutricional del cultivo

Estado nutricional de la parte aérea

El estudio nutricional de las plantas se realizó en el día 17 DDT y al final del cultivo para conocer si los sistemas y tratamientos ensayados producían alguna alteración en la concentración de nutrientes ya que uno de los problemas que causa la falta de oxígeno en la solución nutritiva es la disminución en la absorción de estos por las raíces. La figura 4.6 muestra la concentración foliar de nitrato y nitrógeno total en las hojas en los dos muestreos analizados. En el sistema flujo-reflujo en el muestro del día del 17 DDT, la concentración de nitratos no fue afectada por los

tratamientos, mientras que en el muestreo final la concentración fue similar para las plantas de los tratamientos FR20 y FR25, y, esta mayor que la de las plantas FR15.

En el sistema flotante, en el muestreo del día 17 DDT, la concentración de nitratos fue más alta para las plantas SF10 con respecto a aquellas en el tratamiento SF01; mientras en el muestreo final la concentración fue más alta para las plantas del tratamiento SF01 y SF05, lo que supuso un incremento significativo de alrededor del 9 % con respecto a las de SF10 (5,62 mg/100mg PS).

En cuanto al nitrógeno total, las únicas diferencias significativas se vieron en el primer muestreo del sistema flujo-reflujo. En este sistema, las plantas del tratamiento FR25 disminuyeron significativamente su concentración con respecto a aquellas de los tratamientos FR15 y FR20, no observándose diferencias entre estas dos últimas.

Al analizar todos los manejos en su conjunto en la cosecha realizada al final del experimento se observó como “SF01” y “SF05” obtuvieron resultados significativamente superiores que el resto de manejos en cuanto al contenido de nitratos.

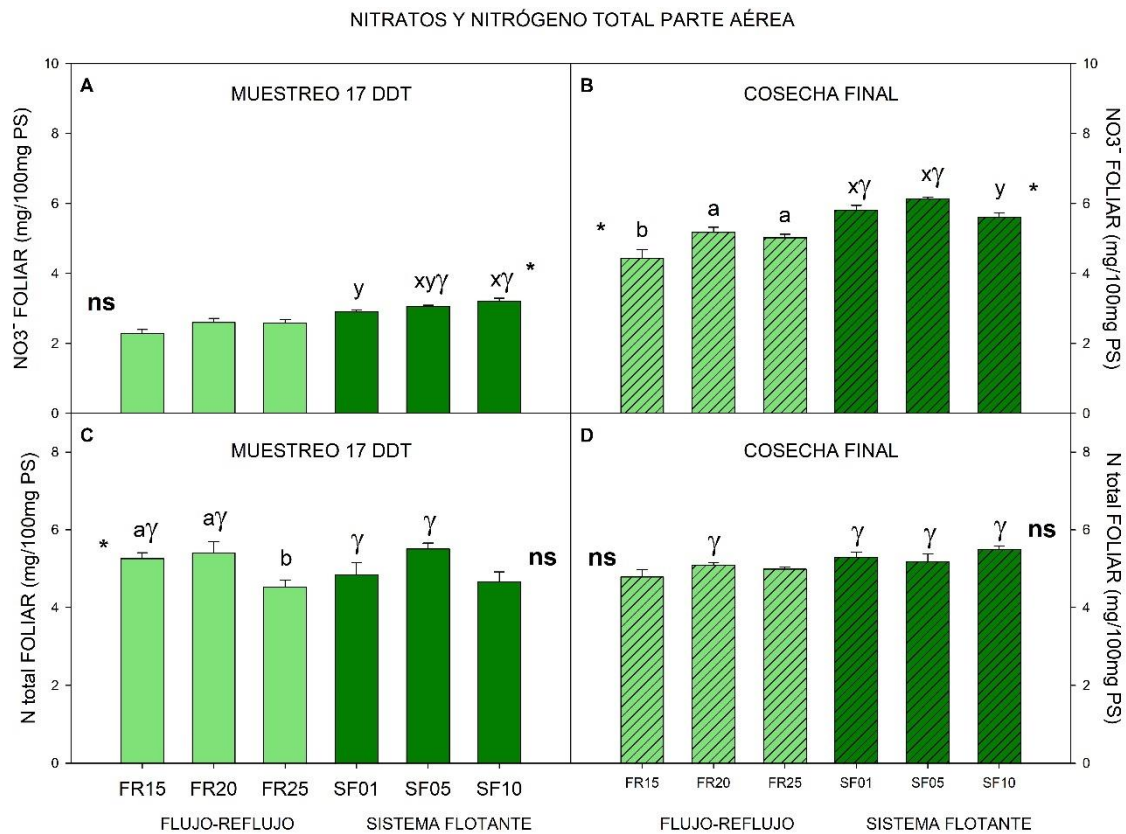


Figura 4.6. Concentración de nitratos y nitrógeno total en hoja (mg/100mg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A y C) y cosecha final (B y D). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que * indica significancia con $0.1 > P \geq 0.01$. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a y b para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

Siguiendo con la concentración foliar de los macronutrientes (K, Ca, P, S, y Mg), datos mostrados en la figura 4.7 y 4.8, se observó en el sistema flujo-reflujo que la concentración de Ca en el primer muestreo, y la del K en el primer y segundo muestreo siguieron un mismo modelo de respuesta con los tratamientos ensayados, ya que se la concentración tiende a aumentar en las plantas del tratamiento FR20. En la concentración foliar de S y Mg, las diferencias significativas entre tratamientos se dan en el primer muestreo. En la concentración de S, los valores fueron similares para las plantas de los tratamientos FR20 y FR25, siendo mayores que para los del tratamiento FR15. En el Mg, la concentración incrementó significativamente siguiendo el orden creciente $FR15 < FR25 < FR20$.

En el sistema flotante, en el primer muestreo, existen diferencias significativas en la concentración del K y P, ya que las plantas del tratamiento SF01 tienden a tener una mayor concentración que aquellas plantas de los otros dos tratamientos. En el muestreo final las diferencias significativas entre tratamientos se dan en la concentración foliar de Ca y P, siendo similar el modelo de respuesta para estos dos nutrientes. Las plantas de los tratamientos SF05 y SF10 tuvieron una concentración similar, y, esta fue significativamente mayor que para las plantas del tratamiento SF01. La concentración de S, en el primer muestreo, fue mayor en las plantas SF01 que en las plantas SF05 y SF10 no existiendo diferencias entre estos dos últimos tratamientos (Fig. 4.8). En el muestreo final, las plantas del tratamiento SF10 tuvieron una mayor concentración de S y Mg que aquellas de los otros dos tratamientos.

Al analizar todos los manejos estudiados durante el ensayo de forma conjunta, se observó que en la cosecha final no hubo ninguno que destacase sobre el resto en cuanto al contenido de K, si bien, los manejos “SF05” y “SF10” fueron los que mayor concentración foliar de Ca y P alcanzaron. En el caso del Mg y el Na, “SF10” fue significativamente superior al resto de manejos.

En el estudio de micronutrientes se midieron B, Cu, Mn, Mo, Fe y Zn para las plantas de los dos sistemas y cada uno de los tres tratamientos por sistema (Fig. 4.9 y 4.10). En el sistema flujo-reflujo, la concentración de B en las dos cosechas, y la concentración de Mn en el muestreo final no dependió de los tratamientos. La concentración de Cu en los dos muestreos y la de Mn en el primer muestreo siguieron un modelo muy parecido ya que las plantas del tratamiento FR20 fue la que tuvo el valor más alto, no dándose diferencias significativas entre los otros tratamientos, excepto en el Cu en el primer muestreo, en el que las plantas del tratamiento FR15 tuvieron una mayor concentración que aquellas del tratamiento FR25. En el Mo, Fe y Zn, las diferencias significativas entre tratamientos se dieron en el Fe para los dos muestreos, y, en el Zn en el muestreo final. En el caso del Fe en los dos muestreos, las plantas del tratamiento FR20 tuvieron una mayor concentración que las de los otros dos tratamientos en los que no hubo diferencias

significativas entre ellos. La concentración de Zn fue más baja para las plantas del tratamiento FR25 que la de los otros dos tratamientos.

En el sistema flotante, excepto en la concentración de Mo en el primer muestreo, se observaron diferencias entre tratamientos. Las mayores concentraciones de nutrientes en el primer muestreo se observaron para el Fe en el tratamiento SF01 y en el Zn en SF10, en el muestreo final, en el Mo, Fe, Zn en el tratamiento SF10. En este sistema, no hubo diferencias significativas entre tratamientos para el Mn en el primer muestreo, sin embargo, en el segundo muestreo y en la concentración de B y Cu tanto en el primer como en el segundo muestreo la concentración fue similar para las plantas SF05 y SF10, y, esta concentración fue más alta que para las plantas SF01.

Al estudiar el global de manejos propuestos en la cosecha final de este experimento, se percibió que las concentraciones de B y Cu fueron superiores en los manejos SF05 y SF10, mientras que, para Mn, Mo, Fe y Zn, SF10 fue únicamente el que mayores resultados obtuvo.

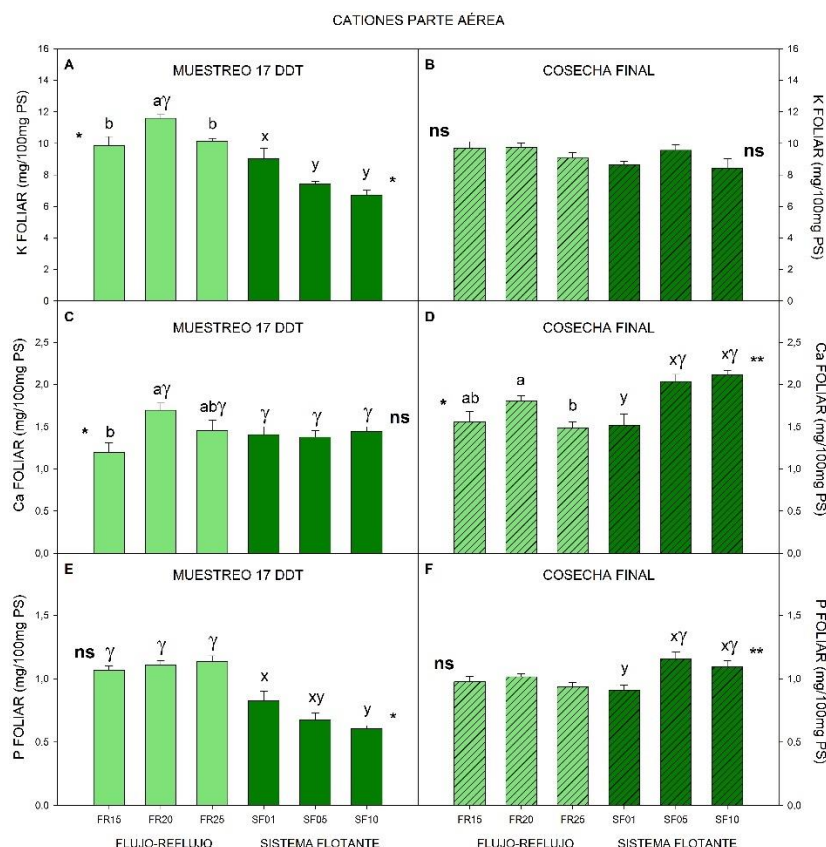


Figura 4.7. Concentración de cationes K, Ca y P en hoja (mg/100mg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A, C y E) y cosecha final (B, D y F). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que * y ** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$ y $0.01 > P \geq 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a y b para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0.05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

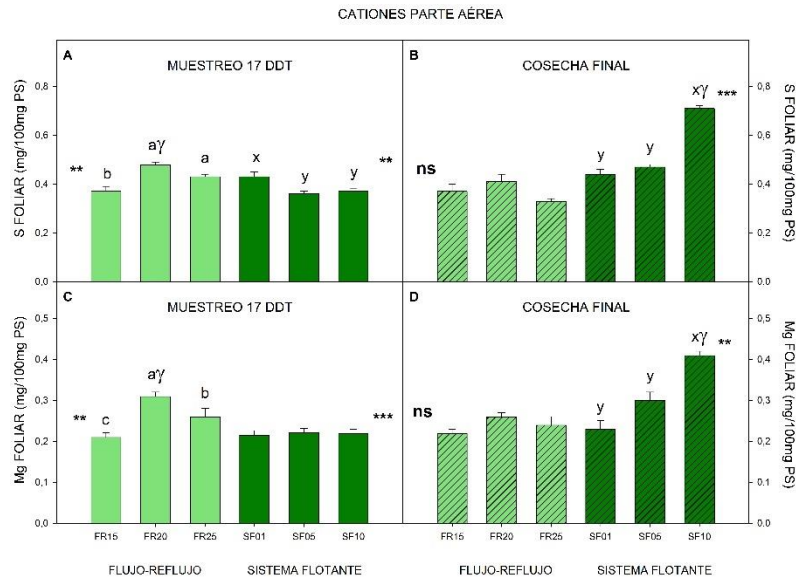


Figura 4.8. Concentración de cationes S y Mg en hoja (mg/100mg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A y C) y cosecha final (B y D). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a, b, c para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica el manejo que obtuvo mayor valor de los seis estudiados para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

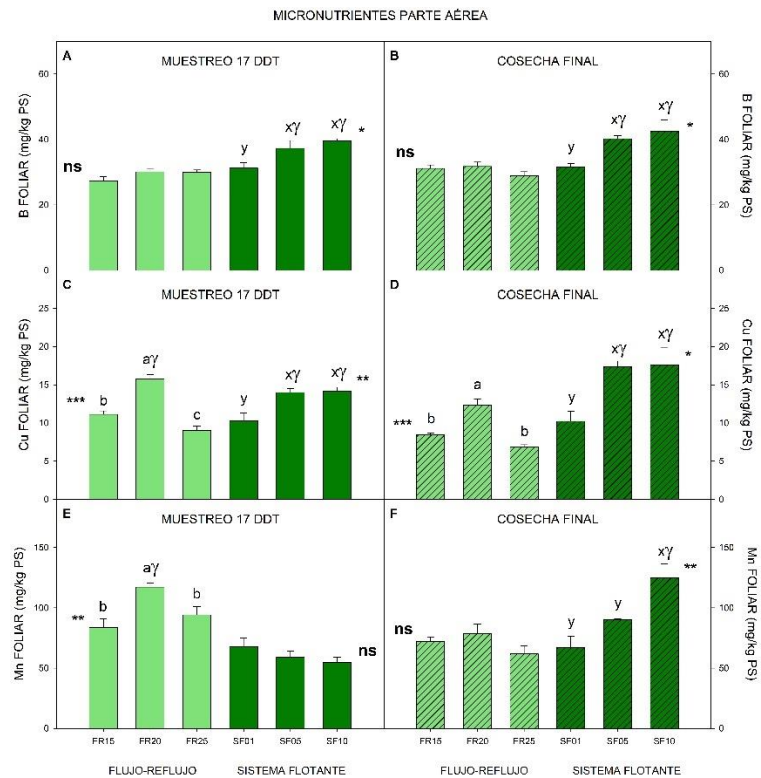


Figura 4.9. Concentración de micronutrientes B, Cu y Mn hoja (mg/kg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A, C y E) y cosecha final (B, D y F). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a, b, c para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

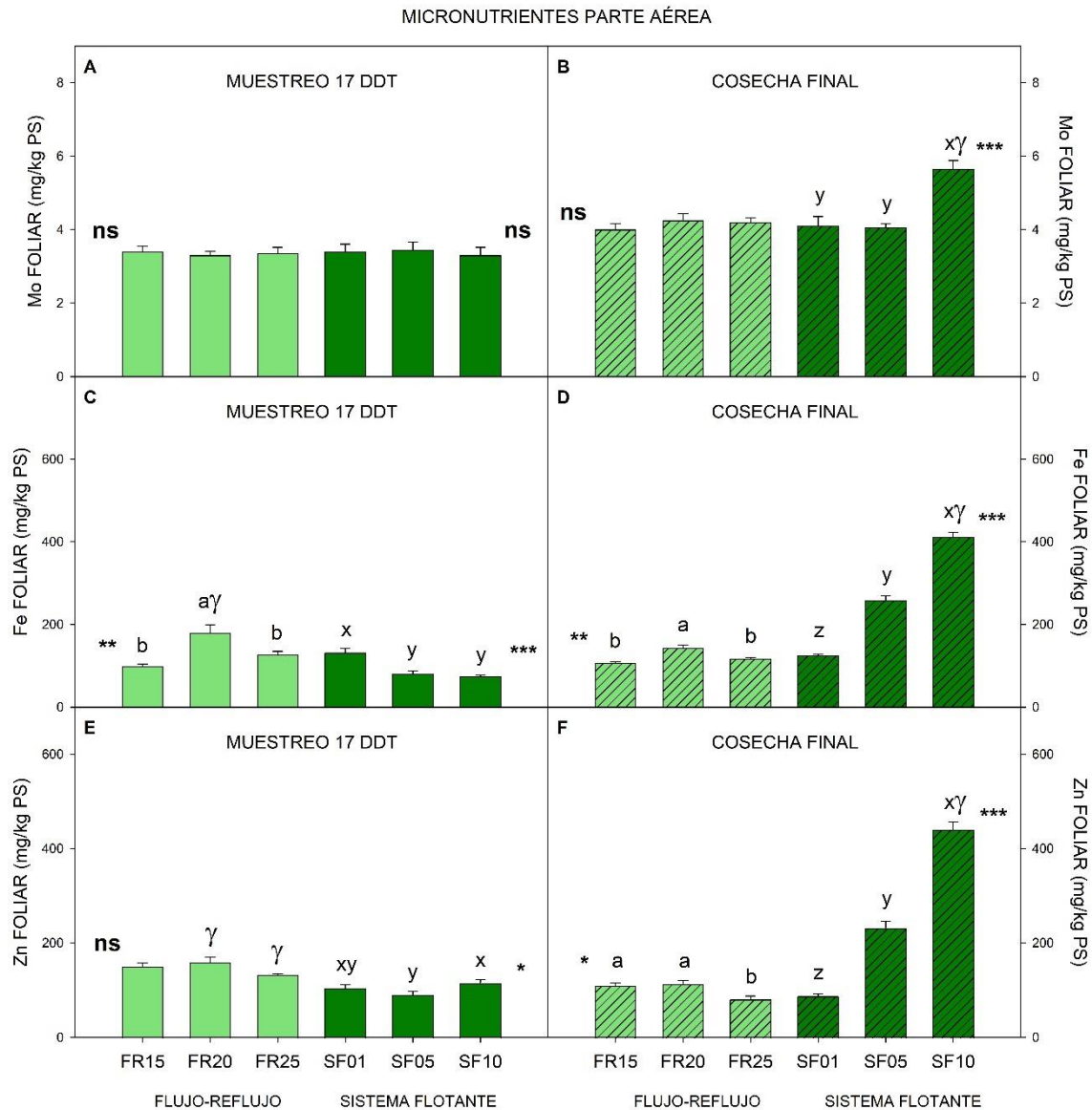


Figura 4.10. Concentración de micronutrientes Mo, Fe y Zn en hoja (mg/kg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A, C y E) y cosecha final (B, D y F). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a y b para flujo-reflujo; x, y, z para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

Estado nutricional de la raíz.

La figura 4.11 muestra la concentración de nitrato y nitrógeno total en raíz en los dos muestreos analizados. En el sistema flujo-reflujo en el muestro del día del 17 DDT, la concentración de nitratos no fue afectada por los tratamientos, mientras que en el muestreo final la concentración fue similar para las plantas de los tratamientos FR20 y FR25, y, esta mayor que la de las plantas FR15. En cuanto al nitrógeno total, en el muestro del día del 17 DDT, la concentración de nitrógeno fue significativamente mayor en el tratamiento FR20 con respecto a

FR15 y FR25, mientras que en el muestreo final la concentración fue similar en los tratamientos FR20 (5,36 mg/100mg PS) y FR25 (5,06 mg/100mg PS), siendo mayor significativamente que la concentración presentada en el tratamiento FR15 (4,15 mg/100mg PS).

En el sistema flotante, en el muestreo del día 17 DDT, la concentración de nitratos fue más alta para las plantas SF05 con respecto a aquellas en el tratamiento SF01 y SF10; mientras en el muestreo final no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos estudiados. En cuando al nitrógeno total, en el primer muestreo (DDT 17), la mayor concentración se presentó en el tratamiento SF05, que supuso un aumento significativo con respecto SF10. Mientras, en el muestreo final, el tratamiento que mayor concentración obtuvo fue el SF01 con 5,74 mg/100 mg PS lo que supuso un incremento significativo en torno al 4 % respecto a SF05 y SF10.

En la cosecha final, las lechugas cultivadas bajo el manejo FR15 obtuvieron la menor concentración de nitratos en la raíz del conjunto de manejos propuestos, mientras que en el nitrógeno total las plantas de los tratamientos FR20 y SF01 tuvieron la concentración más alta (Fig. 4.11).

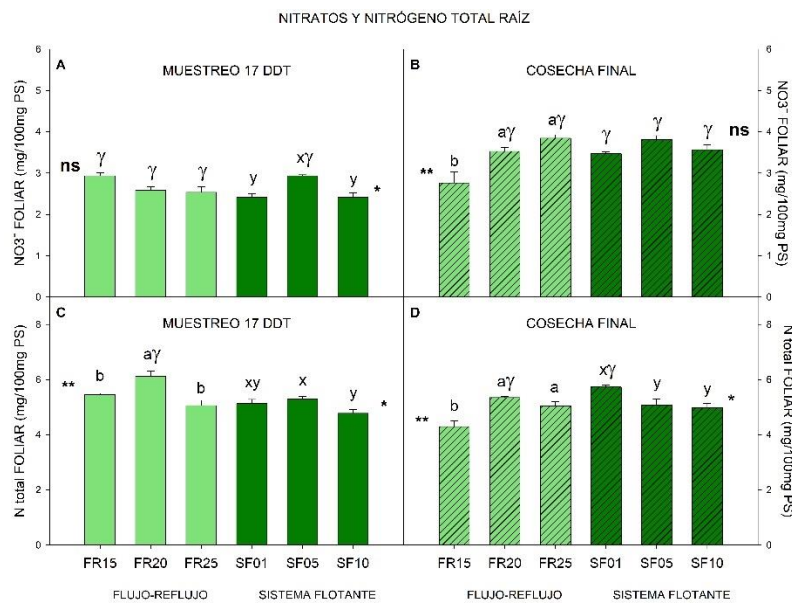


Figura 4.11. Concentración de nitratos y nitrógeno total en raíz (mg/100mg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A y C) y cosecha final (B y D). Los datos representan las medias $\pm$ SE con n=5. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que * y ** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$ y $0.01 > P \geq 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a y b para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

En la concentración en raíz de los macronutrientes (K, Ca, P, S, y Mg), datos mostrados en las figuras 4.12 y 4.13, se observó que en el sistema flujo-reflujo la concentración de Ca y P en el primer muestreo, y la del K en segundo muestreo no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos estudiados. Por otro lado, en el primer muestreo, las plantas del tratamiento

FR20 obtuvieron la mayor concentración de K, lo que supuso un aumento con respecto a FR25. En el segundo muestreo, la mayor concentración de Ca se dio en el tratamiento FR20, mientras que en el P se dio con los tratamientos FR20 y FR25.

En cuanto al sistema flotante, en el primer muestreo, existen diferencias significativas en la concentración del Ca y P, encontrando la mayor concentración en los tratamientos SF10 y SF01, respectivamente. No se encontraron diferencias significativas en el caso del K en este primer muestreo. En cuanto al segundo muestreo no se encontraron diferencias significativas en el contenido de P, mientras que en la concentración de K se obtuvo la mayor concentración en las plantas del tratamiento SF10 y de Ca en aquellas del tratamiento SF01.

Al estudiar cuáles fueron los manejos que obtuvieron una mayor concentración foliar se encontró que los manejos que mayor contenido tuvieron fueron: FR15, FR25 y SF10 para K, FR20, SF01 y SF05 para Ca, y SF01 y SF10 para P.

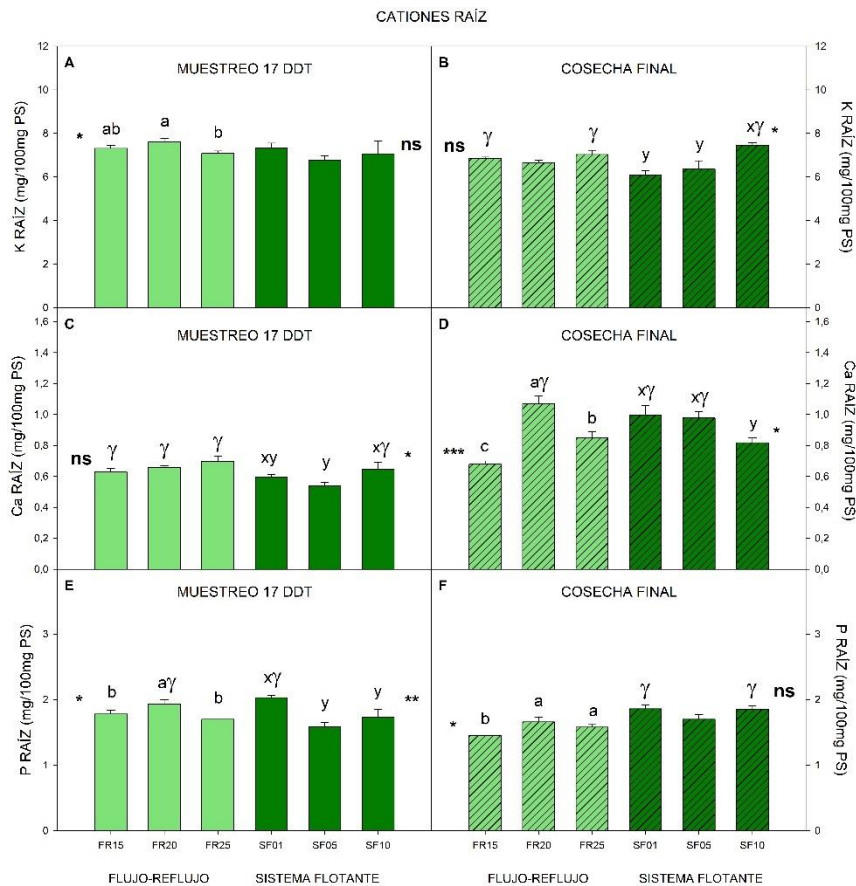


Figura 4.12. Concentración de cationes K, Ca y P en raíz (mg/100mg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A, C y E) y cosecha final (B, D y F). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a, b, c para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

En la concentración radicular de S y Mg (Fig. 4.13), en el sistema flujo-reflujo, sólo se observaron diferencias significativas para el contenido de S en el segundo de los muestreos realizados, donde los tratamientos FR20 y FR25 obtuvieron las mayores concentraciones con respecto a FR15.

En cuanto al sistema flotante, en un primer muestreo sólo se observaron diferencias significativas en cuanto al contenido de Mg aumentando la concentración de forma significativa de manera que SF01 < SF05 < SF10. En el segundo muestreo, el contenido en S fue significativamente mayor en SF10 con respecto a SF01 y SF05.

Al estudiar cuáles fueron los manejos que obtuvieron una mayor concentración foliar se encontró que los manejos que mayor contenido tuvieron fueron: “SF10” para S, y todos los manejos de SF para Mg.

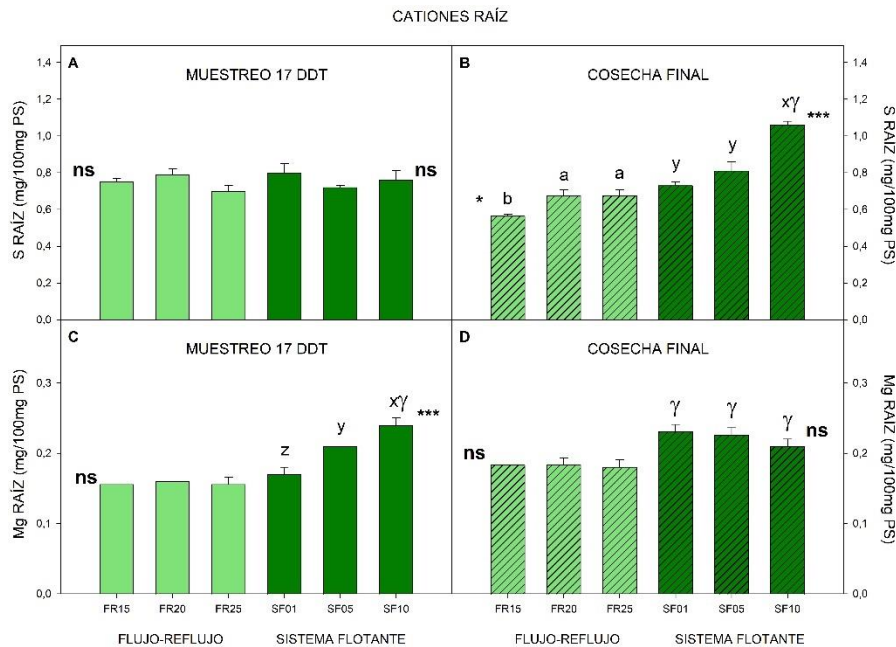


Figura 4.13. Concentración de cationes S y Mg en raíz (mg/100mg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A y C) y cosecha final (B y D). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que * y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a y b para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

En el estudio de micronutrientes en raíz se midieron B, Cu, Mn, Mo, Fe y Zn para los tratamientos de cada uno de los sistemas de riego empleados (Fig. 4.14 y 4.15). En el sistema flujo-reflujo, la concentración de B no dependió de los tratamientos en la primera cosecha. En los dos muestreos realizados, las concentraciones de Cu y Mn siguieron un modelo parecido, siendo significativamente mayores en el tratamiento FR20. El B en la segunda cosecha obtuvo las mayores concentraciones en los tratamientos FR20 y FR25.

En el sistema flotante no hubo diferencias significativas entre tratamientos para el B en la segunda cosecha, mientras que el resto de micronutrientes si presentaron diferencias para los dos muestreos realizados. En la primera cosecha, B obtuvo una concentración significativamente mayor en el tratamiento SF10 con respecto a los tratamientos SF01 y SF05. El contenido en Cu siguió un modelo similar en los dos muestreos realizados, arrojando valores significativamente mayores en el sentido SF01 > SF05 > SF10. El Mn, en una primera cosecha obtuvo las mayores concentraciones en SF01 y SF05, mientras que en la cosecha final la obtuvo únicamente en SF01.

En la cosecha final, se estudiaron qué manejos fueron los que mayores concentraciones de micronutrientes obtuvieron en el conjunto del ensayo. En el caso del B, se observó que todos los manejos fueron estadísticamente iguales, excepto el FR15 que fue inferior. En cuanto al Cu, destacó el manejo SF10, mientras que el mayor contenido en Mn se dio en los manejos FR20 y FR25.

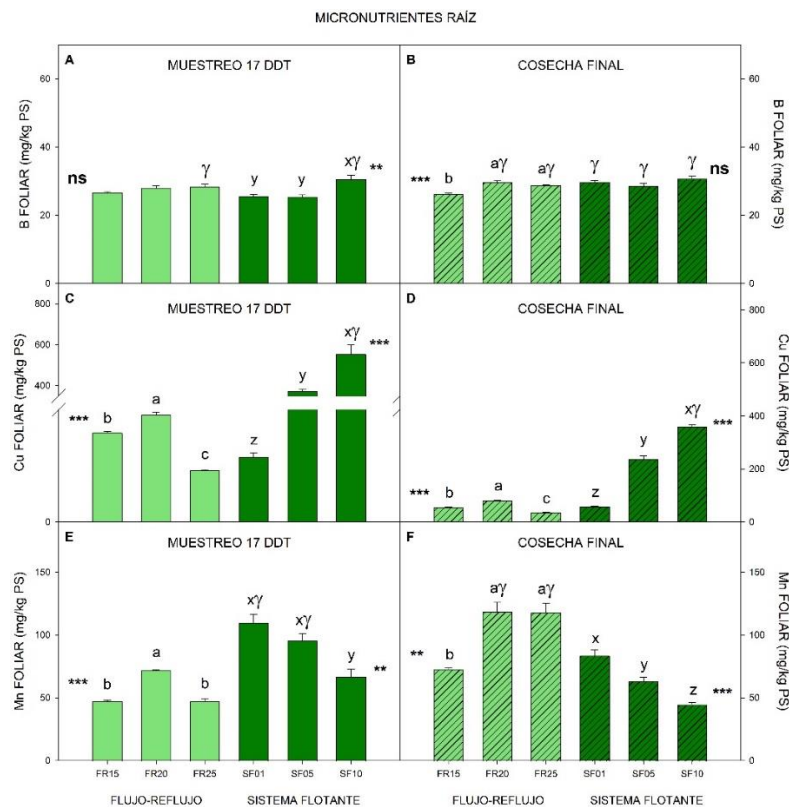


Figura 4.14. Concentración de micronutrientes B, Cu y Mn raíz (mg/kg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A, C y E) y cosecha final (B, D y F). Los datos representan las medias $\pm$ SE con n=5. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a, b, c para flujo-reflujo; x, y, z para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

El Mo, Fe y Zn, reveló que en el sistema flujo-reflujo, no se dieron diferencias significativas únicamente en el caso del Zn en la segunda cosecha realizada, mientras que en el resto de micronutrientes si se observaron diferencias para los dos muestreos realizados. En el caso

del Fe, la mayor concentración radicular se dio en el tratamiento FR20 para ambas cosechas. En el caso del Mo se dieron los mayores valores en el tratamiento FR20 en la primera cosecha y en los tratamientos FR20 y FR25 en la segunda, mientras que el Zn obtuvo una concentración significativamente mayor en el tratamiento FR15 en la primera cosecha.

En cuanto al sistema flotante, en la primera cosecha no se dieron diferencias significativas en el caso del Mo, mientras que Fe y Zn siguieron un modelo similar, obteniendo las mayores concentraciones en los tratamientos SF05 y SF10. En la segunda cosecha, el Fe no presentó diferencias entre sus tratamientos, mientras que Mo y Zn obtuvieron las mayores concentraciones en el tratamiento SF10.

Al comparar los seis manejos entre sí, se observó en la cosecha final, que las mayores concentraciones se obtuvieron en manejos del SF: “SF01” para Mo, “SF05” y “SF10” para Zn, mientras que todos los manejos de SF fueron estadísticamente superiores en cuanto a Fe.

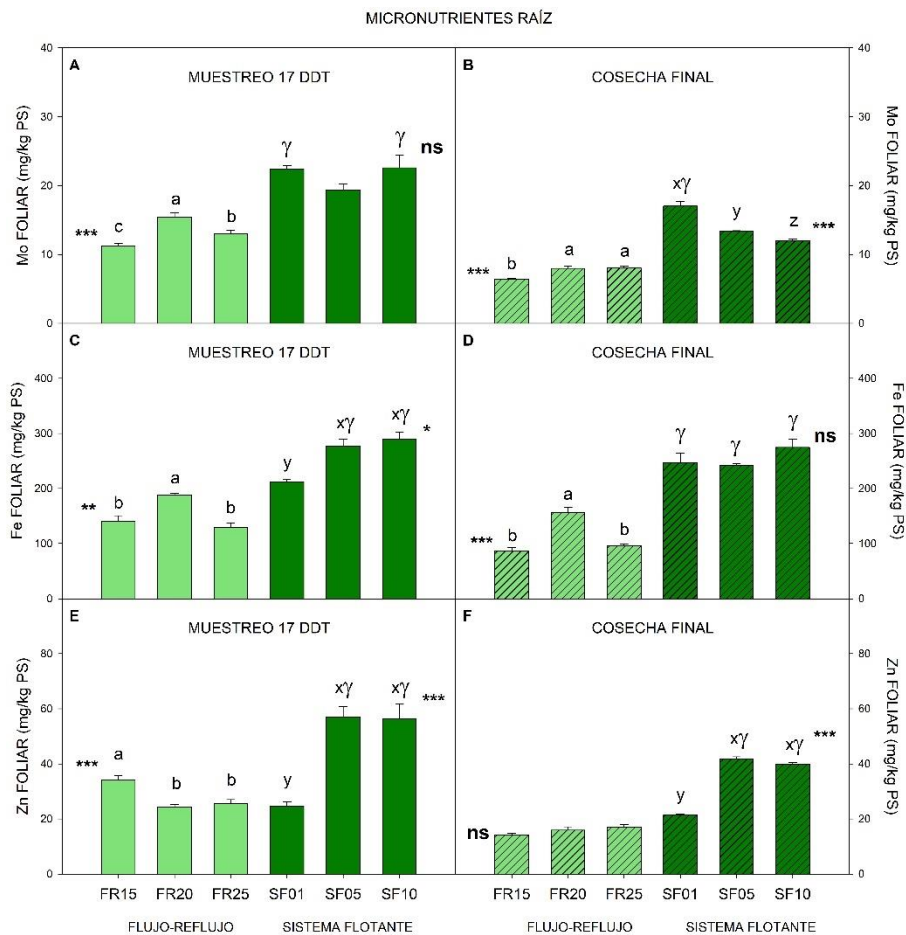


Figura 4.15. Concentración de micronutrientes Mo, Fe y Zn hoja (mg/kg PS) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en el muestreo 17 DDT (A, C y E) y cosecha final (B, D y F). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a, b, c para flujo-reflujo; x, y, z para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

4.3.4. Parámetros de intercambio gaseoso (fotosíntesis)

En la figura 4.16 se pueden observar los parámetros de intercambio gaseoso medidos en la cosecha final: asimilación neta de CO_2 ($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2\cdot\text{s}$), transpiración foliar ($\mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2\cdot\text{s}$), conductancia estomática ($\mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2\cdot\text{s}$), concentración de CO_2 subestomático ($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2\cdot\text{s}$) y eficiencia del uso del agua (WUE; $\mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol H}_2\text{O}$). En el caso de las plantas cultivadas con sistema flujo-reflujo, el tratamiento que mayor asimilación neta de CO_2 indujo en las plantas fue el FR20 ($16,87 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2\cdot\text{s}$), lo que supuso un incremento significativo del 30,50 % y 156,36 % con respecto a los tratamientos FR15 y FR25, respectivamente. El tratamiento que indujo una mayor transpiración foliar fue el FR25 ($8,29 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2\cdot\text{s}$), presentando diferencias significativas con respecto al tratamiento FR15. La conductancia estomática siguió un modelo idéntico a la transpiración, siendo las plantas del tratamiento FR25 las que dieron los valores más altos ($2195,50 \mu\text{mol H}_2\text{O}/\text{m}^2\cdot\text{s}$), presentando un incremento significativo del 151,35 % con respecto al tratamiento FR15. En cuanto a la concentración de CO_2 subestomático las plantas del tratamiento FR25 fueron las que dieron los valores más altos con unos incrementos del 10,36 % y 10,21 % con respecto a los tratamientos FR20 y FR15. La eficiencia del uso del agua presentó los valores mayores en los tratamientos FR15 y FR20 con valores de 2,10 y $2,20 \mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol H}_2\text{O}$, respectivamente, que supusieron un incremento significativo del 175 % con respecto a FR25.

En sistema flotante, las plantas del tratamiento SF10 fueron las que tuvieron los valores mayores de asimilación neta de CO_2 ($12,43 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2\cdot\text{s}$), mientras, en la transpiración foliar las plantas que tuvieron los valores más altos fueron las del tratamiento SF05, que presentó un incremento significativo del 30,09 % y 50,64 % con respecto a los tratamientos SF01 y SF10, entre los cuales no se dieron diferencias significativas. En la conductancia estomática, las plantas del tratamiento SF05 ($2790,33 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2\cdot\text{s}$) fueron las que dieron los valores más altos, con unos incrementos significativos del 99,06 % y del 230,87 % con respecto a los tratamientos SF01 y SF10, entre los cuales no se dieron diferencias significativas. En el parámetro del CO_2 subestomático las plantas del SF05 fueron las que presentaron valores mayores, lo que supuso un incremento significativo con respecto al tratamiento SF10 del 10,63 %. La eficiencia del uso del agua presentó el valor mayor en el tratamiento SF10 ($2,37 \mu\text{mol CO}_2/\mu\text{mol H}_2\text{O}$), con diferencias significativas con respecto SF01 y SF05.

Al comparar entre sí todos los manejos que compusieron el experimento se observó que las plantas con los valores más altos fueron los siguientes: FR20 en fotosíntesis neta, FR20, FR25 y SF05 en la transpiración, FR25 y SF05 en la conductancia estomática, FR25, SF01 y SF05 en concentración de CO_2 subestomático, y FR15, FR20 y SF10. en eficiencia del uso del agua.

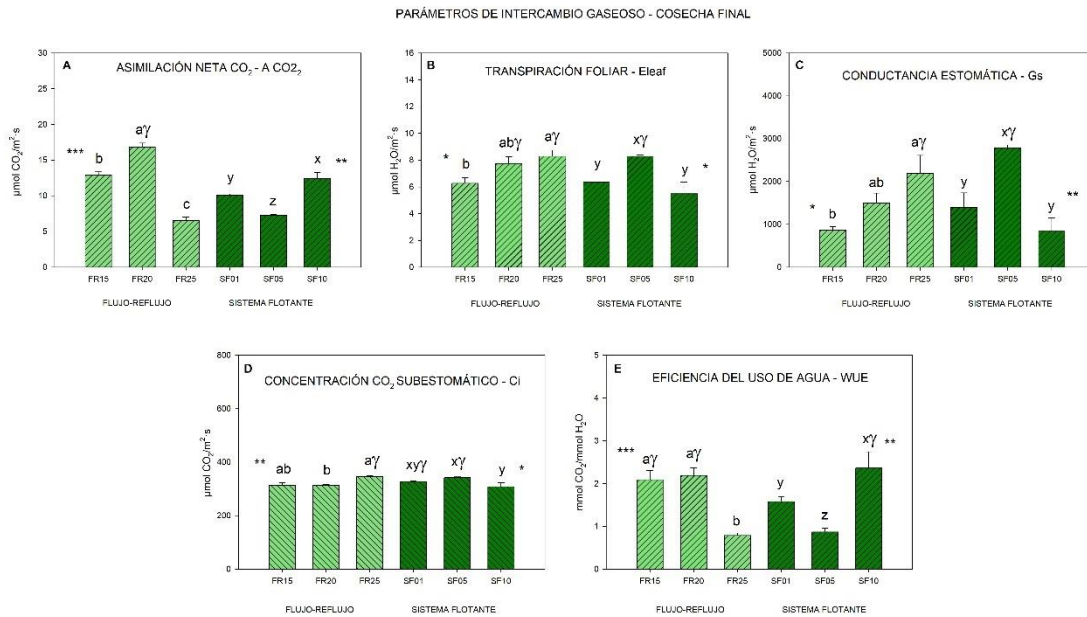


Figura 4.16. Parámetros de intercambio gaseoso en la cosecha final: (A) fotosíntesis neta ($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2\cdot\text{s}$), (B) índice transpiración ($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2\cdot\text{s}$), (C) conductancia estomática ($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2\cdot\text{s}$), (D) concentración de CO_2 subestomático ($\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2\cdot\text{s}$) y (E) eficiencia del uso del agua ($\text{mmol CO}_2/\text{mmol H}_2\text{O}$) medidos. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a, b, c para flujo-reflujo; x, y, z para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron o mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

4.3.5. Parámetros de calidad

Color y textura

En la tabla 4.5 se pueden observar los diferentes parámetros de color medidos en hojas: luminosidad (esc. 0-100), Cromaticidad a y b (esc. 0-100), Saturación (esc. 0-100) y Ángulo Hue (grados), para lechugas de la cosecha final. Para el sistema de flujo-reflujo, ninguno de los parámetros estudiados presentó diferencias significativas entre los tratamientos. En cuanto al sistema flotante, únicamente la luminosidad presentó diferencias significativas entre tratamientos, debido a que las plantas del tratamiento SF10 tuvieron los valores más altos. Con respecto a la comparación entre los dos sistemas, la cromaticidad fue el único parámetro que no presentó diferencias entre sistemas. Luminosidad, cromaticidad b y saturación fueron significativamente mayores en el sistema flotante, mientras que en el caso del ángulo HUE el sistema flujo-reflujo fue el que arrojó valores mayores.

En la figura 4.17 se muestran los datos obtenidos para textura en hoja en los diferentes tratamientos estudiados para la cosecha final. En el sistema flujo-reflujo, los valores de textura interna, externa y total no dependieron de los tratamientos propuestos, no observándose diferencias significativas entre ellos. En cuanto al sistema flotante, las tres texturas medidas tuvieron un comportamiento similar, obteniéndose los mayores valores en el tratamiento SF05, lo

que supuso un incremento significativo con respecto SF01 y SF10, no encontrándose diferencias significativas entre estos dos últimos.

Al comparar entre sí todos los manejos que compusieron el experimento se observó que los manejos con los valores más altos fueron los siguientes: “SF01” y “SF10” en luminosidad, “FR20” fue estadísticamente inferior en cromaticidad b^* y saturación, todos los manejos del FR obtuvieron mayores valores que aquellos de SF en cuanto a ángulo HUE y en cromaticidad a^* no se encontró ningún manejo que destacara sobre el resto.

Tabla 4.5. Parámetros que determinan el color en hoja: Luminosidad (esc. 0-100), Cromaticidad a y b (esc. 0-100), Saturación (esc. 0-100) y Ángulo Hue (grados) en hoja para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en la cosecha final.

SISTEMA	TRAT.	LUM. L*	CROMA. a*	CROMA. b*	SATUR. C	ÁNG. HUE (°)
FR	FR15	48,10	-19,74	30,36 γ	36,23 γ	123,15 γ
	FR20	47,92	-19,44	29,92	35,70	123,14 γ
	FR25	48,68	-19,57	30,30 γ	36,09 γ	123,02 γ
	ANOVA FR	ns	ns	ns	ns	ns
SF	SF01	50,96 xy γ	-19,52	31,32 γ	36,94 γ	122,19
	SF05	49,75 y	-19,48	30,60 γ	36,29 γ	122,54
	SF10	51,57 x γ	-19,66	31,49 γ	37,14 γ	122,11
	ANOVA SF	*	ns	ns	ns	ns

Los datos representan las medias con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que * indica significancia con $0.1 > P \geq 0.01$. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (x e y para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

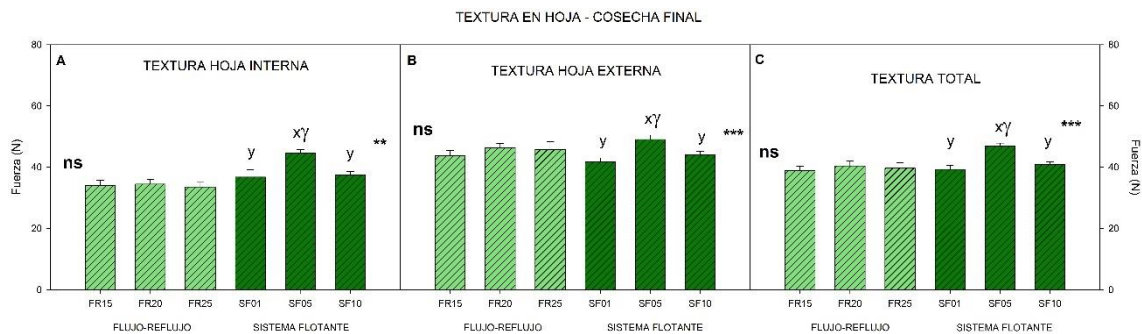


Figura 4.17. Textura en hoja (Fuerza - N) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en la cosecha final: (A) textura hoja interna, (B) textura hoja externa y (C) textura total. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$ (textura total), $n=5$ (textura interna y externa). ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (x e y para sistema flotante) y γ indica el manejo que obtuvo mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

Clorofilas (uds. SPAD).

El contenido en clorofilas (uds. SPAD) en la cosecha final se puede observar en la figura 4.18. En el sistema flujo-reflujo, el mayor contenido en clorofilas se observa en el tratamiento FR15 con 12,13 unidades SPAD, lo que supuso un incremento significativo del 35,42 % y 50,88

% con respecto a los tratamientos FR20 y FR25, entre los cuales no existen diferencias. En el sistema flotante, el mayor contenido en clorofilas se dio en los tratamientos SF01 y SF10, con 13,62 y 12,70 uds. SPAD, respectivamente, y, estos fueron significativamente superiores al valor obtenido en el tratamiento SF05. En el estudio comparativo del conjunto de manejos ensayados, “SF01” y “SF10” fueron los que mayor contenido en clorofilas tuvieron.

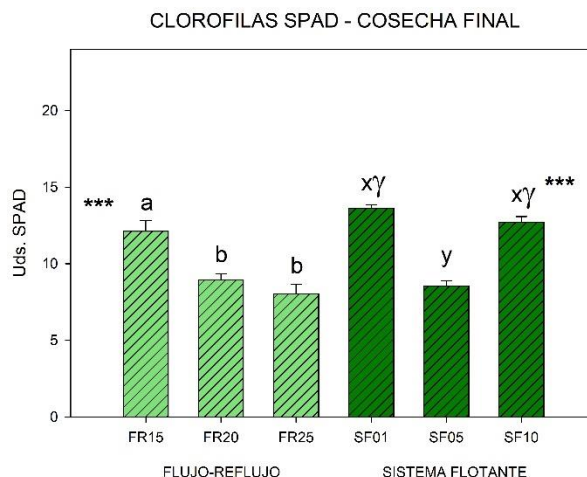


Figura 4.18. Concentración de clorofilas (uds. SPAD) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en la cosecha final. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. * indica significancia con $0.1 > P \geq 0.01$. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a y b para flujo-reflujo; x e y para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

4.3.6. Análisis bioquímicos

En la cosecha final realizada en el experimento se evaluaron los siguientes parámetros bioquímicos: peróxido de hidrógeno (H_2O_2), peroxidación lipídica (MDA) y capacidad antioxidante (%RSA). En la figura 4.19 se pueden observar los resultados obtenidos para la peroxidación lipídica y la acumulación de peróxido de hidrógeno y en la figura 4.20 los de DPPH.

El estudio de la peroxidación lipídica reveló la inexistencia de diferencias significativas entre los manejos en cada sistema de riego. Sí las hubo en la acumulación de peróxido de hidrógeno. En el sistema flujo-reflujo el manejo FR15 produjo plantas con una mayor concentración con respecto FR20 y FR25. En el sistema de riego flotante, no se encontraron diferencias entre manejos. Al estudiar el conjunto de los seis manejos propuestos, se observó cómo los tratamientos que mayores valores obtuvieron fueron los tres tratamientos del SF para la peroxidación lipídica y el FR15 en la acumulación de peróxido de hidrógeno.

Capacidad antioxidante (DPPH)

El estudio de la capacidad antioxidante (Fig 4.20) mediante la técnica del DPPH reveló que los manejos del sistema FR no mostraron diferencias significativas entre ellos, mientras que sí se encontraron diferencias entre los diferentes manejos del sistema flotante, donde se siguió la

tendencia de a mayor recirculación de SN, mayores valores de DPPH, de manera que SF10 obtuvo los valores de inhibición más altos (43,30 %), significativamente superiores a SF05 (32,98 %) y SF01 (15,70 %). En el análisis del conjunto de manejos ensayados se observó cómo el tratamiento SF10 fue el de mayor capacidad antioxidante.

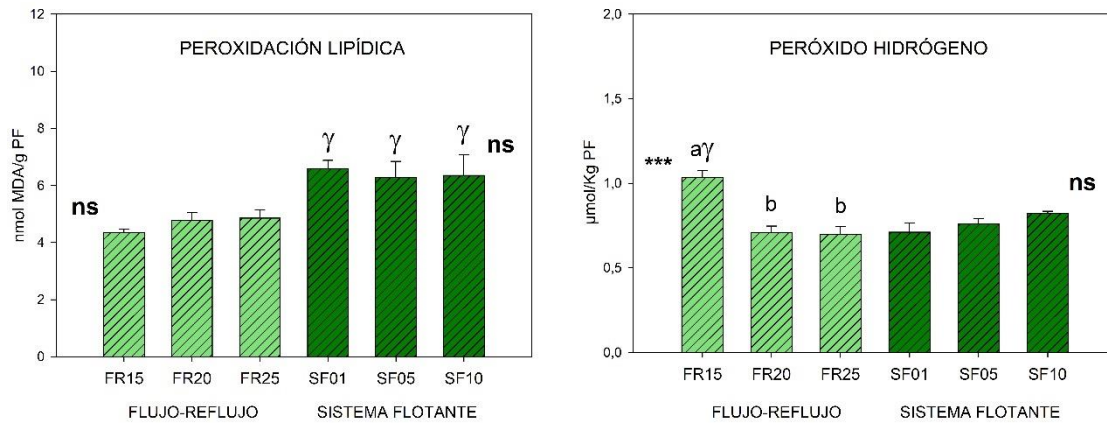


Figura 4.19. (A) peroxidación lipídica ($\mu\text{mol MDA/g PF}$) y (B) acumulación de peróxido de hidrógeno ($\mu\text{mol H}_2\text{O}_2/\text{g PF}$) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en la cosecha final. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *** indica significancia con $P < 0.001$. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (a y b para flujo-reflujo) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

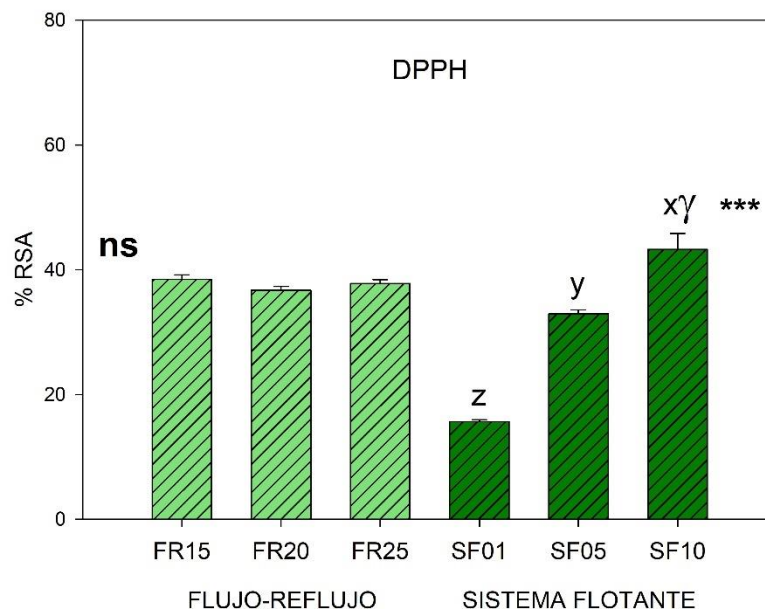


Figura 4.20. Capacidad antioxidante mediante DPPH (% RSA) para FR15, FR20, FR25, SF01, SF05 y SF10 en la cosecha final. Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=5$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *** indica significancia con $P < 0.001$. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos de un mismo sistema de riego (x, y, z para sistema flotante) y γ indica los manejos que obtuvieron mayor valor de los seis estudiados, para $p < 0,05$ según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

4.4. Discusión

Rendimiento agronómico de los sistemas

En este ensayo se pone de manifiesto que para cada uno de los sistemas estudiados es necesario optimizar su manejo para que el cultivo de lechugas del tipo Batavia verde alcance su máximo rendimiento. En el sistema flujo-reflujo, de los tres tratamientos ensayados, el mejor a nivel productivo fueron el FR20 y FR25 (en los que se dejaba la mesa totalmente vacía y las raíces al aire durante 20 y 25 min). Con estos manejos se obtuvieron plantas de mayor peso por unidad, que supuso incrementar el rendimiento de la producción por superficie. Así, mientras que FR20 obtuvo un rendimiento de 433,71 g/planta (3,5 kg/m²), la puesta en marcha del tratamiento FR15 supuso un descenso significativo en la producción al tener las plantas un peso fresco y rendimiento de 393,68 g/planta y 3,1 kg/m², respectivamente. Otros investigadores como Yang y col. (2018) estudiaron diferentes intervalos de inmersión y aireación de raíces en FR para un cultivo de lechuga (cv Biscia Rossa), encontrando como los mayores rendimientos productivos se dieron cuando aplicaban los intervalos de mayor exposición de las raíces al aire, mientras que nuestros resultados indican que la mayor producción se dio en el intervalo intermedio de los tres propuestos. La mayor producción en las plantas del tratamiento FR20 concuerda con los valores más altos de asimilación neta de CO₂, indicando que en las condiciones impuestas en las raíces fueron mejores que para los otros dos tratamientos. La desecación excesiva de las raíces al aire del tratamiento FR25 podrían haber alterado los procesos fisiológicos de estas plantas.

En cuanto al sistema flotante, el mejor tratamiento a nivel productivo fue el SF10 (tratamiento que se recirculaba la SN durante 10 minutos cada 25 minutos, es decir, la bomba está recirculando SN durante 10 minutos seguido de 15 minutos en reposo). Con dicho manejo se consiguieron plantas de mayor peso y, por tanto, mayor rendimiento por unidad de superficie. De esta manera, mientras que con este tratamiento SF10 se obtuvieron plantas de 310,21 g/planta y rendimiento de 2,5 kg/m²; el tratamiento SF01 produjo un descenso significativo del peso fresco de las plantas (273,49 g/planta) y del rendimiento (2,2 kg/m²). En sistemas hidropónicos, existe una estrecha relación entre la concentración de oxígeno disuelto en la SN y la productividad del cultivo. Un entorno de la zona radicular bien oxigenado es esencial para conseguir un sistema radicular sano (buena absorción de nutrientes, crecimiento y mantenimiento de las raíces) y la prevención de enfermedades. Se suele considerar como óptimo una concentración de oxígeno disuelto en agua de valor de 7-8 mg/l de O₂, para la mayoría de las especies (Urrestarazu, 2015), siendo estos valores válidos para lechuga (Brechner y Both, 1996; Ouyang y col., 2020). Por ejemplo, Ouyang y col. (2020) observaron que a partir de 6,5 mg/l de O₂ todos los parámetros medidos se vieron afectados en un cultivo de lechuga. Otros autores bajan este nivel a los 4 mg/l de O₂ (Both, 2003; Brechner y Both, 1996). La anoxia produce daños irreversibles en las plantas, pudiendo provocar la muerte de las mismas. Los niveles de anoxia para lechuga están entre 1,6 y

2,5 mg/l (Both, 2003; Chun y Takakura, 1994; Goto y col., 1996; Sikawa y Yakupitiyage, 2010; Tang y col., 2015; Yoshida y col., 1997). En nuestro ensayo, en el sistema flotante, los valores más altos de la concentración de oxígeno disuelto se dieron en la solución nutritiva del tratamiento SF10. Esto hizo que las plantas no sufrieran episodios de anoxia, y, por tanto, crecieran en mejores condiciones que los otros dos tratamientos, como se ve en los parámetros de producción y rendimiento del cultivo. Estos resultados concuerdan con la asimilación neta de CO₂ y el uso eficaz del agua. Las plantas del SF10 fueron las que tuvieron valores más altos que las plantas de los otros tratamientos, posiblemente debido a que la baja concentración de oxígeno alteró la maquinaria fotosintética de las hojas. Los investigadores Goto y col. (1996), sin embargo, estudiaron 4 concentraciones de O₂ disuelto (2,1, 4,2, 8,4 y 16,8 mg/l) en un sistema flotante de lechugas, no encontrando diferencias significativas en cuanto a la producción.

Comparando los dos sistemas entre sí se puede decir que el flujo-reflujo es el mejor, dando una producción promedio de planta significativamente mayor, con un valor de 413,17 g/planta (3,3 kg/m²), frente a los 293,85 g/planta (2,3 kg/m²) del sistema flotante. Por tanto, del mejor manejo de cada uno de los dos sistemas FR20 vs SF10, el mejor fue para el FR20 del sistema flujo-reflujo. Frasetya y col. (2021) compararon cinco sistemas hidropónicos en cultivo de lechuga (cv Red Rapid), entre ellos un sistema flujo-reflujo y un sistema flotante. En su estudio, en cuanto a peso fresco y contenido en materia seca de la parte aérea obtuvieron resultados diferentes a los obtenidos en nuestro estudio, ya que con el sistema flotante SF se obtuvieron pesos superiores de las lechugas (66,76 g/planta) que con el sistema FR (35,06 g/planta). Conversa y col. (2021) también compararon estos dos sistemas de cultivo para plantas de lechuga de hoja de roble (var. Crispa), encontrando que los resultados variaban en función de la época de cultivo. En primavera se observó que el rendimiento y contenido en materia seca fue mayor en las plantas del SF que las de FR. En otoño, sin embargo, no encontraron diferencias significativas entre los sistemas en la producción, mientras que en el contenido en materia seca fue mayor en las plantas del sistema FR.

Parámetros de calidad de las lechugas

En cuanto los parámetros de calidad organoléptica de textura y color, y clorofilas los tres tratamientos de cada uno de los sistemas mantuvieron los valores estándar para este cultivo, por lo que los tratamientos aplicados afectaron más a la producción que a la calidad de las lechugas. En cuanto al contenido de nitratos en hoja se observa la misma tendencia que los parámetros anteriores. En todos los tratamientos estudiados, las lechugas, tanto en un sistema como en otro, cumplieron con el *REGLAMENTO (UE) N. 1258/2011 DE LA COMISIÓN, de 2 de diciembre de 2011 que modifica el Reglamento (CE) n. 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de nitratos en los productos alimenticios*, que establece el límite máximo de nitratos en hojas de lechuga en 4.000 mg NO₃⁻/kg PF. Al comparar los dos sistemas se observó que el contenido de

nitratos fue significativamente inferior en las lechugas cultivadas en FR, pero como ya se ha indicado anteriormente, ninguno sobrepasó los umbrales de nitratos permitido por las directrices europeas.

Otros estudios también se centraron en analizar cómo variaba la calidad de las lechugas con los sistemas de cultivo. Camejo y col. (2018) encontraron valores similares de textura en su estudio de cultivo hidropónico de Batavia verde var. Lettony (misma variedad que la usada en nuestro estudio), obteniendo resultados en el rango de los 30-50 N. Conversa y col. (2021), estudiaron el color en su ensayo en el que se comparaban diferentes sistemas de cultivo en lechuga de hoja de roble (var. Crispa), no encontrando diferencias significativas entre los sistemas en los parámetros luminosidad, cromaticidad y ángulo hue. Lee y col. (2012), en su estudio con lechugas tipo Batavia (var. Taoyuan No. 1 y Fu San) destinado a promover la producción de hortalizas en túneles altos, encontraron niveles de clorofilas (uds. SPAD) en el rango 27-31 para la var. Taoyuan No. 1 y 20-27 para la var. Fu San, que fueron superiores a los de nuestro experimento (rango 8-14 uds. SPAD). Yang y col. (2018) observó, en la misma línea que nuestro estudio, cómo el sistema FR redujo el contenido de nitratos en hoja para un cultivo de lechuga (cv Biscia Rossa). Fontana y col. (2003) y Nicola y col. (2003) observaron reducciones significativas en el contenido de nitratos en rúcula cuando se usaba FR. En cuanto a sistemas flotantes, Ouyang y col. (2020) informaron como una reducción de O₂ en la SN producía un aumento de la concentración de nitratos en hoja, resultados en la misma línea que los obtenidos en nuestro estudio.

Estudio nutricional de las lechugas desde el punto de vista agronómico

En el estudio del estado nutricional de nuestro ensayo desde el punto de vista agronómico nos reveló que todas las plantas para los dos sistemas y los tres manejos mantuvieron un buen estado nutricional, según los datos de normalidad, deficiencia y toxicidad establecidos por según Kim y col. (2016) y USDA (2021) (tabla 4.6).

Tabla 4.6. Niveles de concentración de déficit, normalidad y toxicidad de elementos minerales en hoja de lechuga según Kim y col. (2016) y USDA (2021).

ELEMENTO	DÉFICIT	RANGO NORMALIDAD	TOXICIDAD
N (mg/100mg PS)	-	2,10-5,60	-
K (mg/100mg PS)	2,80	2,80-13,0	-
Ca (mg/100mg PS)	0,40	0,40-2,06	-
P (mg/100mg PS)	0,09	0,09-2,50	-
Mg (mg/100mg PS)	0,14	0,14-0,95	-
S (mg/100mg PS)	0,19	0,19-0,41	-
Na (mg/100mg PS)	-	0,08-4,40	-
B (mg/kg PS)	22	22-65	75
Cu (mg/kg PS)	2,5	5-18	-
Mn (mg/kg PS)	22	30-198	198
Mo (mg/kg PS)	0,2	0,20-0,38	-
Fe (mg/kg PS)	-	60-248	-
Zn (mg/kg PS)	26	30-66	392

Aunque sí que se pueden destacar algunos resultados. El tratamiento SF10 tiene unos niveles altos Ca, si bien se sobrepasa en muy poca cantidad, alrededor de 0,06 mg/100g PS por encima de los valores normales. El contenido en S, todos los tratamientos del SF están por encima del rango de normalidad, aunque en una cuantía muy reducida como por ejemplo los tratamientos SF01 y SF05 (0,04 mg/100g PS y 0,06 mg/100g PS por encima de los valores normales respectivamente) y en 0,3 mg/100g PS por encima en el tratamiento SF10. Los valores de los micronutrientes es lo que llama más la atención, ya que tuvieron valores muy altos. Así, el Fe supera los límites normales en los tratamientos SF05 y SF10 un 4,31 % y 4,92 % respectivamente. Mo y Zn superan los límites del rango de normalidad en todos los tratamientos de los dos sistemas estudiados: en caso del Mo existen valores diez veces superiores al rango de normalidad, mientras que en Zn FR25 y SF01 superan el rango de normalidad en 20-27 mg/kg PS, FR15 y FR20 en 44 mg/kg PS y SF05 en 160 mg/kg PS, y, por último, el tratamiento SF10 que está más de 340 mg/kg PS por encima del rango de toxicidad.

Estudio nutricional de las lechugas desde el punto de vista de la dieta humana

Los seres humanos necesitan incluir en la dieta cierto contenido de minerales, necesarios en diferentes procesos metabólicos del organismo y que promueven una buena salud (Kim y col., 2016). Si bien es importante no presentar deficiencias en el consumo de estos minerales para prevenir ciertas enfermedades, altos consumos conllevan también problemas para la salud. Los niveles óptimos de consumo diario de elementos minerales en la dieta para un adulto vienen recomendados por las instituciones sanitarias. En la tabla 4.7 se pueden consultar los niveles de consumo diario recomendados por la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición, según Martínez y Lendoiro (2005).

Tabla 4.7. Consumo diario recomendado y nivel máximo tolerable de minerales en la dieta según Martínez, E. y Lendoiro R.M. (2005).

ELEMENTO	CONSUMO RECOMENDADO	MÁXIMO TOLERABLE
N (g/día)	0,5-1,5	-
K (g/día)	3,5-4,7	-
Ca (g/día)	0,8-1,5	2,5
P (g/día)	0,5-1,25	3-4
Mg (mg/día)	240-350	350
S (mg/100mg PS)	-	-
Na (mg/100mg PS)	-	-
B (mg/día)	-	20
Cu (mg/día)	-	5
Mn (mg/día)	1,9-2,3	6-11
Mo (µg/día)	34-45	2000
Fe (mg/día)	8-30	150
Zn (mg/día)	7-12	40

Al hilo de esta recomendación, la Asociación Americana de Dietética estipula que 100 g de lechuga fresca deben aportar en peso (g): K 0,188-0,376; Ca 0,020-0,072; P 0,002-0,021; Mg 0,012-0,038; Fe 1,2-2,7 y Zn 0,160-0,330. Tras el análisis de los resultados obtenidos se puede

concluir que, por cada 100 g de lechuga fresca que resultaron de nuestro experimento, apenas hay diferencias con respecto a los datos aportados por la AAD. Si que se observan pequeñas variaciones, pero insignificantes. Así, el tratamiento FR15 aporta 0,1 g más de K que el recomendado. En el caso del Ca el tratamiento SF10 está 4 mg por encima del rango normal. En cuanto al Mg, los tratamientos FR25 y SF01 tendrían un déficit de 4 mg. Por otro lado, en cuanto al micronutriente Zn, 100 g de lechuga de los tratamientos SF05 y SF10 sobrepasaron en 11 mg/100 mg PS el contenido recomendado, aunque estando por debajo del máximo recomendable. Por lo tanto, futuros estudios deberían dilucidar porque en estos sistemas se producen una alta acumulación de los micronutrientes, y, como se podría disminuir su concentración para que no afecte su consumo a las personas.

Respuestas de estrés oxidativo

Las plantas cultivadas con algún tipo de estrés sufren daños oxidativos (Mittler, 2002), al que responden mediante la puesta en marcha de una serie de sistemas antioxidantes. Los daños oxidativos suelen estar producidos por la generación de especies reactivas de oxígeno (ROS) en respuesta al estrés, que son formas parcialmente reducidas del oxígeno, como puede ser el peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Uno de los efectos más importantes que producen la acumulación de ROS son daños en las proteínas, peroxidación lipídica y muerte celular (Munné-bosch y Alegre, 2002; Smirnoff y Wheeler, 2000). En respuesta a estos fenómenos, las plantas desarrollan mecanismos de tolerancia que se ponen en marcha para paliar los desequilibrios oxidativos (Shao y col., 2008; Slater, 1984) y actúan como regeneradores celulares. Por otro lado, en la actualidad, la mejora en la producción comercial de lechuga tiene como uno de sus objetivos el conseguir incrementos de compuestos antioxidantes, que satisfaga la demanda cada vez mayor por parte de los consumidores de alimentos saludables (Luna, 2017). En nuestro ensayo, los niveles de peroxidación lipídica no fueron afectados por ninguno de los manejos en cada sistema de riego, pero sí que se observa que la concentración de MDA es mayor para las plantas del sistema flotante que para las plantas del sistema flujo-reflujo. Esto está en concordancia con los resultados de la producción ya que este último sistema fue el más productivo. Por lo tanto, en nuestras condiciones de cultivo el sistema flotante induce un mayor estrés oxidativo en las plantas que podría estar relacionado con la menor producción de este sistema. En cuanto al DPPH no se dieron diferencias significativas entre los manejos del FR, mientras que se observó una clara tendencia en SF, de manera que cuanto mayor fue la recirculación de la SN en la zona radicular de las lechugas mayor fue el DPPH, y, esto podría estar relacionado con la temperatura de la SN. Sakamoto y col. (2015) realizaron un estudio en un cultivo hidropónico con SF proponiendo diferentes temperaturas en SN a nivel radicular (10, 20, 25 y 30 °C), resultando que, a menor temperatura de SN, mayor DPPH fue encontrada. En el caso de nuestro estudio, una mayor recirculación de SN mantuvo temperaturas más bajas de SN a nivel de raíz, puesto que el estancamiento de SN en la mesa

conlleve un mayor calentamiento de la SN. Por tanto, son unos resultados acordes con los nuestros. En FR no se observaron diferencias puede que debido a que en este sistema la SN estaba siempre el mismo periodo de tiempo en las mesas de cultivo por lo que la temperatura fue la misma en los tres manejos ensayados.

4.5. Conclusiones

Una vez analizados los resultados obtenidos en el presente experimento, se concluye:

1. En el SF, el intervalo de riego influye significativamente en la concentración de O₂ disuelto en la SN, siendo el mejor manejo el que recircula por más tiempo la solución nutritiva SF10. En sistema FR, el tiempo en el que se dejan las raíces al aire influyó significativamente en los parámetros productivos, siendo el manejo de tiempos FR20 y FR25 los que dan los mejores resultados. Por lo tanto, el mejor tratamiento para el SF fue SF10, y, para el sistema FR el FR20 y FR25.
2. Ninguno de los manejos ensayados en los dos sistemas de cultivo superó la concentración de nitrato en las lechugas, manteniéndose los valores umbrales exigidos por la Unión Europea. Incluso se disminuyó significativamente el contenido de nitratos en hoja en el sistema FR con respecto al SF.
3. Ninguno de los manejos ensayados en los dos sistemas de cultivo produjo deficiencias o toxicidades nutricionales en las plantas.
4. Los sistemas de riego empleados y su manejo apenas alteraron la calidad organoléptica de las lechugas caracterizadas por el color, textura, y, contenido de clorofilas (uds. SPAD).
5. El manejo con mayores valores de asimilación neta de CO₂ resultó el más productivo desde el punto de vista agronómico, indicando que los manejos en cada uno de los sistemas influyen en los procesos fisiológicos de intercambio gaseoso de las plantas.
6. En cuanto a la calidad nutricional para la dieta humana, en la composición mineral, se observó un ligero déficit nutricional en cuanto al aporte de Mg a la dieta humana en los tratamientos FR25 y SF01, y, una gran concentración en los micronutrientes Fe, Mo y Zn. Por lo que es necesario optimizar la concentración de micronutrientes en la solución nutritiva para bajar la concentración de estos micronutrientes en las plantas.

7. Los manejos de riego del SF indujeron a una mayor peroxidación lipídica en las células vegetales quizá debido a los bajos niveles de oxígeno de la SN. La capacidad antioxidante no se vio afectada por los diferentes manejos de FR, mientras que en SF se observó una clara tendencia al aumento de la capacidad al aumentar la recirculación de la SN en la mesa quizá debido al efecto de la temperatura en la SN.

4.6. Referencias bibliográficas

- Both, A. (2003). Ten years of hydroponic lettuce research. *Knowledgecenter. Illumitex.Com*, 18(5), 8.
- Brechner, M., y Both, A. J. (1996). Hydroponic Lettuce Handbook. *Cornell University CEA Program*, 48.
- Camejo, D., Frutos, A., Mestre, T. C., Piñero, C., Rivero, R. M., y Martínez, V. (2020). Artificial light impacts the physical and nutritional quality of lettuce plants. *Horticulture, Environment, and Biotechnology*, 61(1), 59–72.
- Chun, C., y Takakura, T. (1994). Original Paper Rate under of Root Respiration Oxygen of Lettuce Concentrations Various Dissolved in Hydroponics. *Environ. Control in Bio*, 32(2), 125–135.
- Conversa, G., Bonasia, A., Lazzizzera, C., La Rotonda, P., y Elia, A. (2021). Reduction of Nitrate Content in Baby-Leaf Lettuce and Cichorium endivia Through the Soilless Cultivation System, Electrical Conductivity and Management of Nutrient Solution. *Frontiers in Plant Science*.
- Fontana, E., Nicola, S., Hoeberechts, J., y Saglietti, D. (2003). Soilless culture systems produce ready-to-eat corn salad (*Valerianella olitoria* L.) of high quality. *Acta Horticulturae*, 604, 505–509.
- Frasetya, B., Harisman, K., y Ramdaniah, N. A. H. (2021). The effect of hydroponics systems on the growth of lettuce. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1098(4), 042115.
- Gomes-Junior, R. A., Moldes, C. A., Delite, F. S., Gratao, P. L., Mazzafera, P., Lea, P. J., y Azevedo, R. A. (2006). Nickel elicits a fast antioxidant response in *Coffea arabica* cells. *Plant Physiology and Biochemistry*, 44(5-6), 420-429.
- Goto, E., Both, A. J., Bright, L. D., Langhans, R. W., y Leed, A. R. (1996). Effect of dissolved oxygen on lettuce in hydroponics. In *International Symposium on Plant Production in Closed Ecosystems 440* (pp. 205–210).
- Kim, M. J., Moon, Y., Tou, J. C., Mou, B., y Waterland, N. L. (2016). Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Food Composition and Analysis*, 49, 19–34.
- Koleva, I. I., Van Beek, T. A., Linssen, J. P. H., De Groot, A., y Evstatieva, L. N. (2002). Screening of plant extracts for antioxidant activity: A comparative study on three testing methods. *Phytochemical Analysis*, 13(1), 8–17.
- Lee, A. C., Liao, F. S., y Lo, H. F. (2012). “Taoyuan no. 1”: A high-yielding batavia lettuce cultivar high in total phytochemicals and dietary fiber. *HortScience*, 47(12), 1815–1816.
- Martínez-Puga, E., y Lendoiro, R. (2005). Capítulo 7: Ingestas recomendadas de micronutrientes: vitaminas y minerales. *Ingestas Recomendadas*, 87–100.
- Nicola, S., Hoeberechts, J., Fontana, E., y Saglietti, D. (2003). Cultural technique influences on post-harvest quality of rocket (*Eruca sativa* Mill.). *Acta Horticulturae*, 604, 685–690.
- Ouyang, Z., Tian, J., Yan, X., y Shen, H. (2020). Effects of different concentrations of dissolved oxygen or temperatures on the growth, photosynthesis, yield and quality of lettuce. *Agricultural Water Management*, 228(539), 105896.
- REGLAMENTO (UE) N. 1258/2011 DE LA COMISIÓN de 2 de diciembre de 2011 que modifica el Reglamento (CE) n. 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de nitratos en los productos alimenticios.
- Sakamoto, M., y Suzuki, T. (2015). Effect of Root-Zone Temperature on Growth and Quality of

- Hydroponically Grown Red Leaf Lettuce (*Lactuca sativa* L. cv. Red Wave). American Journal of Plant Sciences, 06(14), 2350–2360.
- Sikawa, D. C., y Yakupitiyage, A. (2010). The hydroponic production of lettuce (*Lactuca sativa* L.) by using hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* × *C. gariepinus*) pond water: Potentials and constraints. *Agricultural Water Management*, 97(9), 1317–1325.
- Stanghellini, C., A. v. t. Ooster and E. Heuvelink (2019). Greenhouse horticulture : Technology for optimal crop production. Wageningen, Wageningen Academic Publishers.
- Tang, Y., Gao, F., Guo, S., y Li, F. (2015). The morphology, physiology and nutritional quality of lettuce grown under hypobaria and hypoxia. *Acta Astronautica*, 112, 29–36.
- Urrestarazu, M. (2015). *Manual práctico de cultivo sin suelo e hidroponía*. Ed.: Mundi-Prensa.
- Yang, S.-H., Wang, L.-J., Li, S.-H., Duan, W., Loescher, W., y Liang, Z.-C. (2007). The effects of UV-B radiation on photosynthesis in relation to Photosystem II photochemistry, thermal dissipation and antioxidant defenses in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings at different growth temperatures. *Functional Plant Biology*, 34(10), 907-917.
- Yang, L., Yang, X., Zhao, H., Huang, D., y Tang, D. (2018). Ebb-and-flow subirrigation strategies increase biomass and nutrient contents and reduce nitrate levels in lettuce. *HortScience*, 53(7), 1056–1061.
- Yoshida, S., Kitano, M., y Eguchi, H. (1997). Growth of lettuce plants (*Lactuca sativa* L.) under control of dissolved O₂ concentration in hydroponics. *Biotronics*, 26(May 2014), 39–45.

Capítulo 5:
Experimento 3. Optimización de la
densidad de plantación para el cultivo
hidropónico vertical de ciclo cerrado
de lechuga Butterhead

5. Experimento 3. Optimización de la densidad de plantación para el cultivo hidropónico vertical de ciclo cerrado de lechuga Butterhead

5.1. Introducción

El aumento de los rendimientos en los cultivos es uno de los objetivos prioritarios de la agricultura moderna. El cultivo hidropónico vertical en invernadero constituye una buena alternativa para conseguir este incremento productivo deseado por el sector agrícola debido al aumento de densidad de plantación que proporciona. Además, la lechuga, por su tamaño y por la duración de su ciclo de cultivo, es considerada como la hortaliza de hoja que mejor se adapta al cultivo hidropónico (Petrooulos y col., 2016). No obstante, en cultivos hidropónicos verticales, un aumento de densidad supone un aumento de la inversión, por lo que es conveniente analizar la rentabilidad de dicha inversión.

Como ya se ha apuntado en la introducción de esta memoria, en el cultivo de lechuga vertical en invernadero uno de los factores claves en el diseño de estas estructuras son la densidad de plantación y altura de cultivo, puesto que tienen una clara influencia en la incidencia de luz sobre las plantas: al aumentar la densidad de plantas y descender en altura se prevé que el crecimiento disminuya como efecto de una reducción en la radiación incidente acumulada. En este contexto se realizó un ensayo con el objetivo de determinar qué densidad de plantación es óptima desde el punto de vista productivo y de calidad para un cultivo vertical de lechuga Butterhead bajo invernadero. Para la consecución de este objetivo, se diseñaron tres densidades de plantación: 17, 23 y 32 plantas/m² con siete alturas de canales de cultivo que contenían diez lechugas cada una. Se evaluó la radiación solar incidente acumulada (MJ/m²), el peso fresco de PA (g/planta), el rendimiento por unidad de superficie (kg/m²), la longitud de tallo (cm), el contenido en materia seca de PA (g ms/planta), el contenido relativo de agua de PA (%), el estado nutricional de la PA (mg/100g PS y mg/kg PS), la homogeneidad de la producción, los parámetros de color, el contenido en clorofilas (uds. SPAD) y la eficiencia en el uso de la luz (g ms/MJ·m²) por parte de la planta.

5.2. Material y métodos

5.2.1. Material vegetal

Para el desarrollo de este ensayo se escogió el cultivar de lechuga Butterhead (var. E01D.30340), cuyas semillas fueron suministradas por la casa de semillas Enza Zaden (Cartagena), por su buena adaptación al cultivo hidropónico y a condiciones climáticas más suaves.

5.2.2. Descripción de las instalaciones

La descripción de las instalaciones en las que se llevó a cabo este experimento (invernadero, cámara de germinación y cabezal de riego) se pueden consultar en el apartado 3.2.2. *Descripción de las instalaciones* del experimento 1 de la presente memoria.

Estructuras de cultivo hidropónico vertical.

El ensayo se realizó usando como sistema unas estructuras de cultivo hidropónico vertical (Imagen 5.1) desarrolladas en el marco del proyecto HIDROLEAF (RTC-2016-4827-2). Las estructuras de cultivo hidropónico vertical estuvieron compuestas por paneles de 3,0 x 3,0 m (longitud x altura). Cada panel estuvo construido sobre una estructura de tres pilares de sección redonda de acero galvanizado, anclados al suelo mediante cimentación de hormigón. Dos cruces de San Andrés por cada panel, formadas por flejes de acero galvanizado, contribuyeron al arriostre de la estructura de forma que ofreció una buena resistencia y sujeción ante cualquier esfuerzo lateral que se pudiera producir.



Imagen 5.1. Vista de las estructuras verticales.

En cada panel, los tres pilares sostuvieron ocho canales de cultivo horizontal superpuestos (Figuras 5.1 y 5.2). Cada canal de cultivo se encontró sujeto a la estructura mediante tres abrazaderas (una abrazadera por pilar). Los canales de cultivo fueron fabricados en PVC, con doble pared para un mayor aislamiento térmico y dispusieron de tapa desmontable que permitió una limpieza sencilla y rápida del sistema. Las tapas tenían diez orificios, de 5,5 cm de diámetro y con 30 cm de separación entre ellos, donde se insertaba el conjunto formado por tapón, taco de lana de roca y planta. Cada canal disponía de capacidad para albergar diez lechugas, con lo que el conjunto del panel albergó ochenta lechugas (8 canales x 10 lechugas/canal = 80 lechugas).

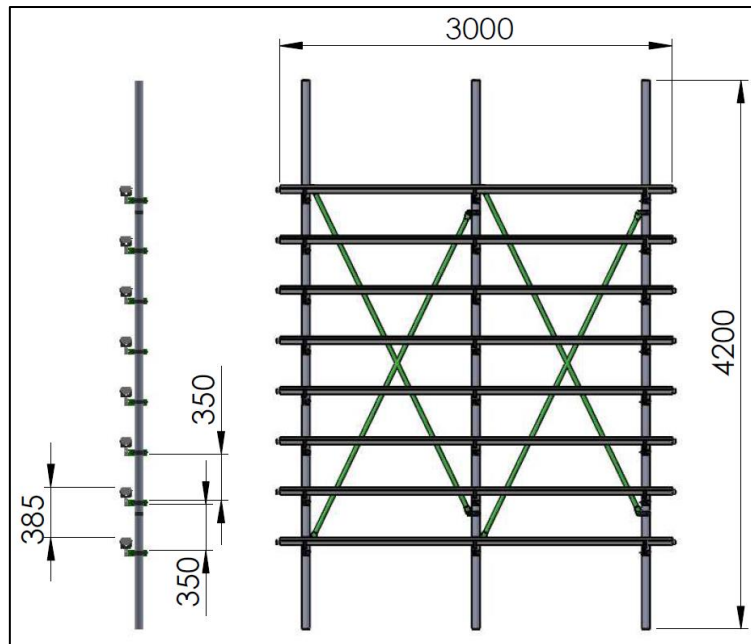


Figura 5.1. Vista perfil y lateral de panel de cultivo vertical.

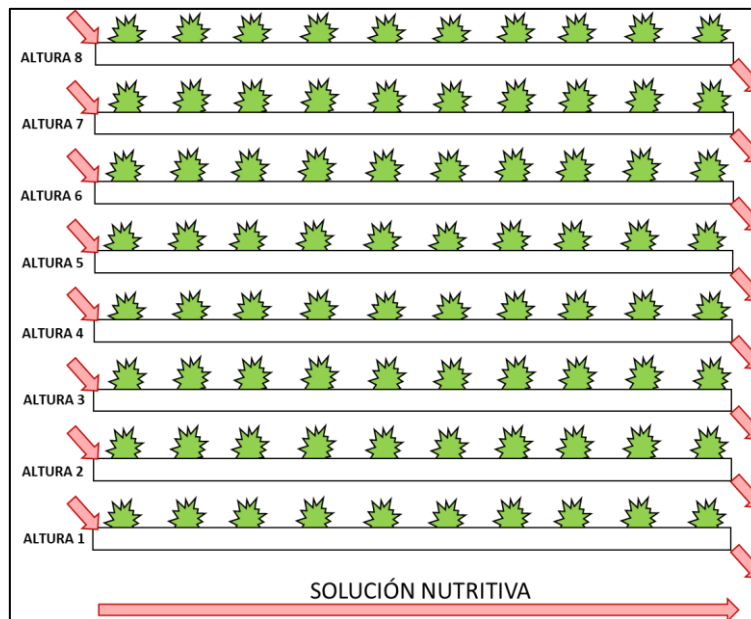


Figura 5.2. Croquis de vista lateral de panel de cultivo vertical.

El riego se hizo mediante el sistema flotante, que se puede consultar en el epígrafe 3.2.2. *Descripción de las instalaciones* de la presente memoria de tesis. Con este sistema, los canales de cultivo permanecieron siempre inundados de SN. La recirculación de SN se realizó de manera que se aseguró la renovación del 100% de la misma en cada canal cada 15 minutos.

La SN estuvo almacenada durante el desarrollo del cultivo en un depósito fabricado en polietileno con capacidad para 500 litros. Además, se dispuso una tapa que impidió que la

suciedad o restos de cultivo entraran en contacto con la SN. El depósito tenía instalados dos sensores de nivel, que informaron cuando al depósito le quedaban 75 litros o cuando alcanzaba los 425 al llenarse. El software HIDROLEAF permitió programar el llenado de estos depósitos desde el cabezal. En el depósito se colocó una bomba sumergible (modelo DREN 075 MA, 300 l/min, DIBOMUR (Murcia)). La salida del depósito alimentó simultáneamente a todos los canales de cultivo, previo paso por un caudalímetro ajustable manualmente que garantizó un caudal homogéneo. Además, una vez la SN salía del depósito, una bifurcación recirculó parte de la SN de vuelta al depósito. Cada canal de cultivo tuvo instalado un sistema de entrada y salida de SN: en uno de los extremos se situó una entrada de SN, mientras que en el extremo opuesto se encontraba un desagüe-rebosadero que hacía retornar la SN al depósito de riego.

La aireación de la SN en las estructuras verticales se llevó a cabo mediante tres métodos, todos ellos del propio sistema de riego-drenaje de la instalación. Fueron los siguientes:

1. Recirculación de la bomba (Imagen 5.2). Parte de la SN que salía por la bomba retornaba al depósito a presión, provocando un burbujeo en la superficie de la SN del depósito. La altura de caída fue variable en función del nivel de SN en el depósito: 10-40 cm.
2. Sistemas de desagüe de estructuras a depósito (Imagen 5.2), que formaba una cascada de altura variable de 10-40 cm.
3. Entrada a presión de SN a canal. La SN, en su entrada a la mesa chocaba con la pared interior del canal, provocando la aireación de la misma.

Estos mecanismos de aireación aseguraron niveles de oxígeno disuelto superiores a los 7-8 mg/l.



Imagen 5.2. Oxigenación de SN en cuba mediante cascada del drenaje y recirculación.

5.2.3. Software para el manejo del cultivo

El software empleado para el manejo del cultivo fue el mismo que el usado en el experimento 1, el software HIDROLEAF, que se puede consultar en el apartado 3.2.3. *Software para el manejo del cultivo* de la presente memoria.

5.2.4. Operaciones de cultivo

La descripción de las operaciones de cultivo realizadas en este experimento 3 (germinación, desarrollo de plántulas y crecimiento de las raíces, trasplante definitivo a sistemas de cultivo hidropónico) se pueden consultar en el apartado 3.2.4. *Operaciones de cultivo* del experimento 1 de la presente memoria.

La composición de la solución nutritiva usada en el ensayo se puede consultar en la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 del apartado 3.2.4. *Operaciones de cultivo* del experimento 1 de la presente memoria.

5.2.5. Diseño experimental

El desarrollo del experimento se llevó a cabo en estructuras de cultivo vertical con tres densidades de plantación diferentes (17, 23 y 32 plantas/m²). Tal y como se ha explicado en el apartado 5.2.2. *Descripción de las instalaciones*, las estructuras verticales constaron de ocho alturas de cultivo. No obstante, en el estudio solamente se consideraron siete alturas, siendo considerada la altura 8 como de efecto borde, por lo que no se tuvieron en cuenta las plantas de esta altura en los resultados. De la misma manera, paneles en los extremos este y oeste del invernadero y lechugas con posición 1 y 10 dentro de un canal fueron también consideradas como bordes y, por tanto, no tenidas en cuenta en el estudio.

Como ya se ha apuntado, los tratamientos consistieron en tres densidades de plantación: 17, 23 y 32 plantas/m² (D17, D23 y D32). La diferente densidad de plantas por m² de suelo se creó modificando el número de estructuras verticales por unidad de superficie. Se establecieron 6, 8 y 12 paneles verticales (orientación norte-sur) para D17, D23 y D32 respectivamente. Cada panel dispuso de 8 canales de cultivo cada uno, con capacidad total para albergar 80 lechugas/panel. En la densidad 17 plantas/m², la distancia media entre las estructuras fue de 1,36 m. En las densidades 23 y 32 plantas/m², las estructuras se agruparon en pares, siendo la distancia entre par y par de estructuras (pasillo) de 1,33 y 1,15 m, y entre estructura en cada par de 0,75 y 0,20 m en las densidades 23 y 32 plantas/m², respectivamente. Los paneles laterales (este y oeste) de cada densidad, como ya se explicó anteriormente, se consideraron bordes y, por tanto, no se incluyeron en los cálculos estadísticos. La primera planta (planta posición 1) y la última (planta posición 10) de cada canal fueron consideradas como bordes, no siendo consideradas en el tratamiento estadístico de datos. Las canales de cultivo de la altura 8 también se consideraron

como bordes. En la figura 5.3 se puede observar la distribución en planta de cómo quedó la distribución en el invernadero.

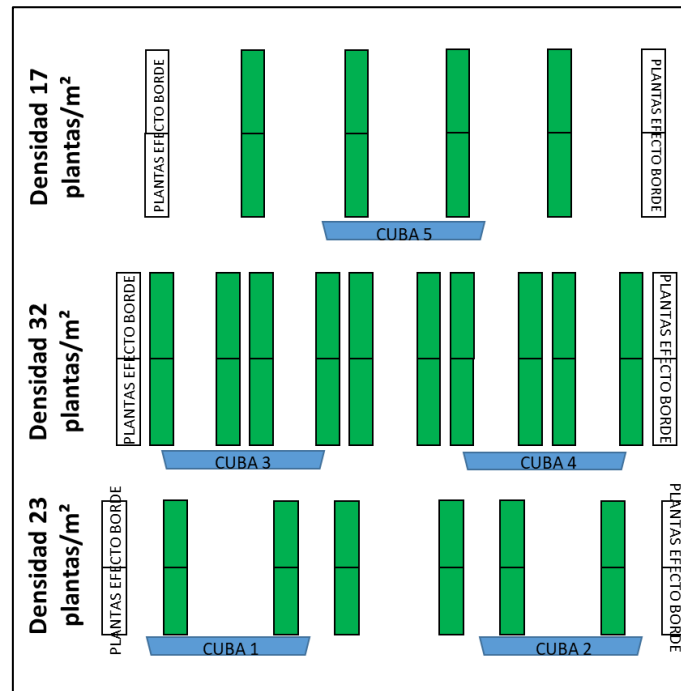


Figura 5.3. Vista en planta de los tratamientos (densidades)

De la figura anterior hay que tener en cuenta que cada rectángulo verde representa la vista en planta de un panel vertical de ocho alturas con capacidad para albergar 80 lechugas.

La germinación se llevó a cabo tal y como viene reseñada en el apartado 3.2.4. *Operaciones de cultivo* de la presente memoria, obteniendo una tasa del 95 % de semillas germinadas. Las bandejas de poliestireno con las semillas germinadas fueron trasladadas al invernadero en 1 DDG (días después de la germinación) y colocadas en mesas de cultivo hidropónico. Este paso previo, denominado *desarrollo de plántulas y crecimiento de las raíces*, fue realizado con el objetivo de proporcionar a la plántula un medio adecuado para favorecer el crecimiento de las raíces y que adquirieran longitud suficiente para que los sistemas de cultivo hidropónico utilizados fueran funcionales (alrededor de 8 cm). Las plántulas y posteriores plantas, fueron regadas con solución nutritiva Hoagland al 100%. La concentración media de fertilizantes utilizada fue la siguiente: KNO_3 (3 mM), $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ (2 mM), MgSO_4 (0.5 mM), KH_2PO_4 (0.5 mM), Fe-EDTA (10 μM), H_3BO_3 (10 μM), $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ (1 μM), $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (2 μM), $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (0.5 μM), and $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (0.5 μM). Se midió el pH y la conductividad eléctrica de la solución nutritiva tres veces por semana y mantenida en unos niveles de 5.0-6.0 y 1.6-1.9 ds/m respectivamente. Durante el período de *desarrollo de plántulas y crecimiento de las raíces*, la temperatura media diurna y nocturna fue respectivamente de 23 y 18 °C, se midió con un transmisor de temperatura fijo "DPF160". El trasplante definitivo (Imagen 5.3) a las estructuras experimentales y puesta en marcha de los tratamientos se produjo respectivamente el 16 DDG,

una vez que al menos el 95% de las raíces de las plantas alcanzaron los 8 cm de longitud y la parte aérea contaba con al menos 4 hojas verdaderas. Se seleccionaron plantas sin anomalías de crecimiento, roturas o defectos tanto en parte aérea como en raíz, asegurando de esta manera un inicio de cultivo lo más homogéneo posible.

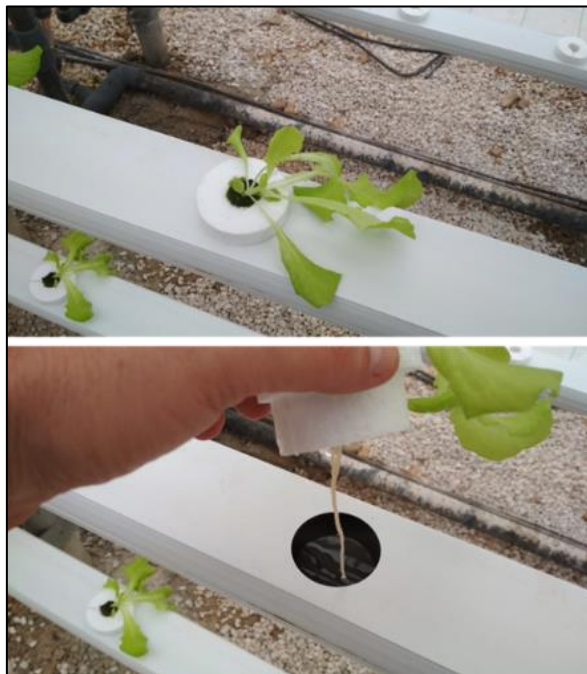


Imagen 5.3. Trasplante definitivo a canales de cultivo de las estructuras verticales.

La gestión del clima en el interior del invernadero fue idéntica que para los experimentos 1 y 2 de la presente tesis, y pueden consultarse en el apartado 3.2.2. *Descripción de las instalaciones* de la presente memoria.

Durante el período experimental, la temperatura media diurna y nocturna del invernadero fue respectivamente de 20 y 15 °C en la operación *Desarrollo de plántulas y crecimiento de las raíces* hasta el 4 de noviembre. La conductividad eléctrica (CE) y el pH de la SN fueron respectivamente de 1,9 ds m⁻¹ y 5,5 tanto en el "*desarrollo de plántulas y crecimiento de las raíces*" como en el período experimental. La CE y el pH se midieron semanalmente con un medidor de CE 'Creason CM35' y un medidor de pH 'Crison pH25'. La concentración media de oxígeno y la temperatura del agua de riego se midieron con un dispositivo "Hach HQ40d" y las medias para el período experimental fueron respectivamente 7,6 mg L⁻¹ y 25 °C a nivel de planta. Se programó el riego para asegurar la renovación del 100% de la SN contenida en cada canal de cultivo cada 15 minutos. Para ello, se estableció un ciclo de riego en el que durante 5 minutos las bombas estaban encendidas aportando agua a las canales y durante 10 las bombas se encontraban apagadas. Los ciclos de riego fueron los mismos entre el día y la noche. La oxigenación del agua se realizó automáticamente por la actividad de circulación de la SN durante el ciclo de riego,

sobre todo a través de la cascada de retorno de solución al depósito una vez había dejado las canales. Tres veces a la semana se tomaron valores en los depósitos de SN de temperatura (°C), pH, conductividad eléctrica (dS/m) y oxígeno disuelto (mg/l). Todas las medidas fueron tomadas con multimedidor digital (HACH HQ40D digital de dos canales, Colorado, EEUU). Se ajustó el pH al rango 5,0-6,0 mediante la adición de ácido nítrico (1M) o hidróxido de sodio (1M).

Durante el desarrollo del experimento, para proceder al reequilibrio nutricional de la SN, semanalmente se tomó una muestra de 100 ml de SN de cada uno de los depósitos de riego. Esta muestra era analizada por el Servicio de Ionómica del CEBAS-CSIC (Campus Universitario de Espinardo; E-30100 Espinardo, Murcia). La concentración de cationes se determinó mediante análisis de plasma de acoplamiento inductivo utilizando 'ICP-OES' (Iris Intrepid II, Thermo Electrón Corporation, Franklin, USA). La concentración de aniones se determinó con el software 'Chromeleon' que procesó los datos adquiridos por un análisis cromatográfico de 'Dionex DX-100'. El pH de los tanques se corregía cada dos días utilizando NaOH o HNO₃. Con los resultados obtenidos de aniones y cationes, se identificaron y corrigieron las deficiencias existentes.

5.2.6. Determinaciones

Determinaciones de radiación incidente y radiación acumulada

La integral de radiación acumulada ($\sum rad$; Kw/m² por planta) se calculó para cada lechuga y representó la integral de todo el ciclo del cultivo. El cálculo se basó en la suma de la integral de radiación externa del periodo preexperimental (*desarrollo de plántulas y crecimiento de las raíces*) y del periodo experimental. Ambas se multiplicaron por el coeficiente de extinción de la luz del invernadero. Además, para el periodo experimental, la integral de radiación externa se multiplicó por un coeficiente que expresaba la diferencia de luz incidente entre las unidades experimentales.

$$\sum rad = \sum_{k=d1}^{dx} radT1 * \tau + \sum_{k=d1}^{radT2} radT2 * \tau * v$$

donde:

- $\sum rad$ = Integral de radiación incidente por unidad experimental (Kw/m² por planta).
- RadT1 = Integral de radiación incidente en periodo preexperimental (Kw/m²).
- RadT2 = Integral de radiación incidente en periodo experimental (Kw/m²).
- τ = Coeficiente de extinción de luz en el invernadero.
- v = Coeficiente de reducción de la luz dependiente de la posición de cada unidad experimental en el invernadero.

El coeficiente de extinción de la luz (τ) se calculó como la relación entre la radiación interna y la externa. En el interior del invernadero se diferencié entre las dos porciones de material

que componían la cubierta (EVA, PC). Como resultado, se encontraron dos τ , 0,80 para EVA y 0,65 para PC. PC ocupaba el 30% de la cubierta y el EVA el 70%, por lo que el valor global de τ del invernadero se calculó como $0,80 \cdot 0,70 + 0,65 \cdot 0,30 = 0,75$.

El coeficiente de reducción de luz (v) se calculó como la relación entre la medida de luz (Klux/planta) de cada unidad experimental y la medida de luz de una planta de referencia (Klux/planta). La medida de luz de cada unidad experimental se estimó de la siguiente manera: se utilizó un luxómetro (PCE-group PCE-174) con el que se registró la luz (Klux) en la parte superior de las lechugas números 1, 5 y 10, para las canales 1, 4 y 8 del sistema vertical. En los paneles verticales de cultivo, la luz se midió en 5 puntos igualmente espaciados entre sí. Cada medición de la luz se repitió en tres momentos diferentes del día (periodos 9:30-11:30; 11:30-13:30; 13:30-15:30). Cada medición de la luz se corrigió en función del tiempo para eliminar el efecto de la condición de radiación externa (nubosidad). Se calculó la media de las tres mediciones corregidas. De este modo, se dispuso de 9 datos por cada leja de cultivo vertical. Para estimar la luz en cada ubicación de la unidad experimental, se asumió una correlación lineal entre los puntos medidos. El mismo procedimiento se utilizó primero entre cada canal y después entre las alturas. Una vez que cada unidad experimental tenía un valor de luz, cada valor se puso en función de la planta de referencia (Klux/Klux). La planta de referencia fue la planta que arrojó el mayor valor de radiación. Se asumió que, en la planta de referencia, v era 1. Como resultado, se calculó el valor de v para cada unidad experimental en función de su ubicación.

La ecuación multiplicó RadT2 por v . Sin embargo, RadT2 midió la irradiancia (Kw/m^2) y v basándose en los datos de Klux porque no fue posible medir la radiación PAR (radiación activa fotosintética) en cada unidad experimental, sino sólo la luz (Klux). Sin embargo, como se encontró una correlación lineal entre las medidas de luz (Klux) y las medidas de intensidad PAR ($\mu\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$), se asumió que también la radiación (KWh/m^2) y la luz (Klux) estaban correlacionados linealmente. Para la medición de radiación incidente, se utilizó un medidor de luz "PCE-group PCE-174" para medir la luz (Klux) por encima de cada unidad experimental. Un medidor de luz "Asense Tek ALP-01" se utilizó para determinar la intensidad de la luz ($\mu\text{mol/m}^2 \cdot \text{s}$) y el espectro de la luz (nm). Además, un sensor de radiación solar fijo 'Ritec 2RS420' midió la irradiación fuera y dentro del invernadero (KWh/m^2) durante todo el ciclo de cultivo. Los datos, una vez obtenidos en KWh/m^2 fueron presentados en MJ/m^2 .

Determinaciones de parámetros de producción

Se midieron los parámetros productivos peso fresco (g/planta), longitud de tallo (cm/planta), materia seca (g ms/planta) y contenido relativo de agua (%) en una cosecha final realizada en 30 DDT (Días después del trasplante). A partir del peso fresco (g/planta) se calculó el rendimiento productivo (g/m^2). Para la determinación de todos los parámetros productivos, se muestrearon lechugas de cuatro paneles por cada densidad de cultivo. Para el peso fresco se

recogieron datos de cuatro lechugas por cada una de las siete alturas que existieron, siendo el total de 112 lechugas muestreadas para cada una de las densidades que compusieron el estudio. Para el resto de parámetros productivos (longitud de tallo, materia seca y contenido relativo de agua), se muestrearon dos lechugas por cada una de las siete alturas, siendo un total de 56 lechugas muestreadas por cada una de las densidades existentes. Los protocolos seguidos para la determinación de estos parámetros fueron los mismos que se realizaron para el experimento 1, tal y como se expone en el epígrafe 3.2.6. *Determinaciones de la presente tesis.*

Determinación de análisis nutricional

Para el análisis nutricional (mg/100 mg PS de los macronutrientes y mg/kg PS de los micronutrientes) se muestrearon lechugas de cuatro paneles por cada densidad de cultivo, a razón de dos lechugas de las alturas A1, A3, A5 y A7, en 30 DDT, siendo un total de 32 lechugas muestreadas para cada una de las densidades que compusieron el estudio. Los protocolos de toma de muestras y su procesamiento en laboratorio para la determinación del análisis nutricional son los mismos que se emplearon en el experimento 1 (se pueden consultar en el apartado 3.2.6. *Determinaciones de la presente memoria*).

No se realizó ninguna determinación en raíz debido a la dificultad de separarlas. El poco volumen que había en cada canal provocó que raíces de plantas contiguas aparecieran totalmente mezcladas. El intento de separar las raíces provocó en la mayoría de los casos la rotura de las mismas.

Determinación de parámetros de calidad

Color y clorofilas (uds. SPAD) se midieron en el muestreo realizado en 30 DDT en cuatro paneles por cada una de las densidades estudiadas. Se tomaron datos de dos lechugas por cada una de las siete alturas existentes en cada panel, siendo un total de 56 lechugas muestreadas por cada una de las densidades existentes. Para determinar los parámetros de color se hicieron 6 medidas por lechuga, tres en hojas externas y tres en hojas internas, seleccionando hojas sanas, sin síntomas de clorosis ni daños, tomando las medidas en la parte superior de la hoja sin nervaduras. Los protocolos seguidos para la determinación de estos parámetros fueron los mismos que se realizaron para el experimento 1, tal y como se expone en el epígrafe 3.2.6. *Determinaciones de la presente tesis.*

Determinación de eficiencia en el uso de la luz

La eficiencia de uso de la luz (LUE; g ms/MJm⁻²) se calculó como la relación entre el peso seco de la parte aérea (g ms/planta) y la radiación integral incidente (Σ rad) acumulada por planta (MJ/m²).

Determinación de relación entre parámetros productivos y radiación incidente

Se hicieron seis grupos de radiación, agrupando los pesos frescos de las lechugas del invernadero que recibieron una radiación acumulada similar y se enfrentaron con los parámetros productivos de las lechugas dentro de cada grupo. Para la elaboración de estos grupos se tomó el rango de radiación acumulada “mayor radiación acumulada MJ/m² en lechuga - menor radiación acumulada MJ/m² en lechuga”. Los grupos de radiación observados se muestran en la tabla 5.1:

Tabla 5.1. Grupos de radiación (MJ/m²) observados en el experimento.

GRUPO RADIACIÓN	RADIACIÓN MÍNIMA (MJ/m ²)	RADIACIÓN MÁXIMA (MJ/m ²)
1	170,12	206,17
2	206,18	242,22
3	242,23	278,27
4	278,28	315,32
5	314,33	350,37
6	350,38	386,42

5.2.7. Tratamiento estadístico de datos

Se utilizó el software Microsoft Excel 2016 (Microsoft, Washington, EEUU) para la gestión y tratamiento de datos, cálculo de valores medios, error estándar SE. Para la representación gráfica de resultados se utilizó SIGMAPLOT 14.5 (SYSTAT). Para el análisis estadístico, se utilizó el software Statistical Package for the Social Sciences 26 (SPSS) (IBM, New York, EEUU). Se determinó la existencia de la distribución normal en los datos por la prueba de normalidad según Shapiro-Wilk para tamaños de muestra (n) inferiores a 50 (n<50) y según Kolmogorov-Smirnov para n>50. Se determinó la homogeneidad de las varianzas por el estadístico de Levene. Se realizó una prueba t de Student y un análisis ANOVA, con la prueba post-hoc de Duncan para la determinación de diferencias significativas entre tratamientos y de los subconjuntos, estableciéndose como diferencias significativas para 0,05>p>0,01 y muy significativas para p<0,01, y sin diferencias significativas (ns) para p>0,05.

5.3. Resultados**5.3.1. Radiación incidente acumulada**

La figura 5.4 muestra la radiación acumulada de los tres sistemas, que difieren entre sí en la densidad de plantación, D17, D23, y D32, durante todo el experimento. El sistema de densidad D17 fue el que recibió una mayor radiación solar con valores cercanos a los 300 MJ/m², mientras que los otros dos sistemas recibieron una radiación de 200 MJ/m². La radiación acumulada en cuanto a la altura de las baldas de cada uno de los sistemas sigue un mismo modelo en los tres sistemas. Al incrementar la altura incrementó progresivamente la radiación acumulada, dándose, por tanto, la mayor radiación acumulada en la altura 7 y la menor en la altura 1 en cada uno de los tres sistemas.

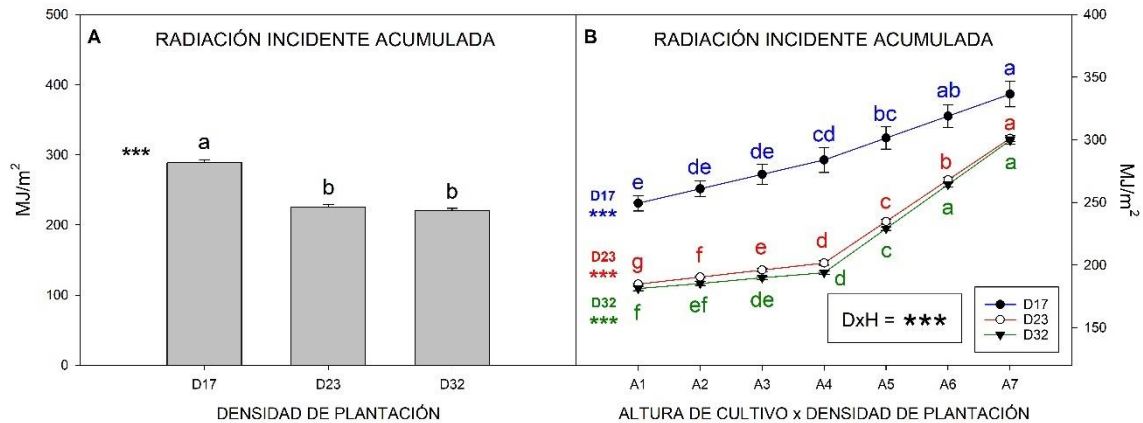


Figura 5.4. Radiación incidente acumulada (MJ/m²) para D17, D23 y D32: según densidad de plantación (A) e interacción densidad de plantación y altura de cultivo (B). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=4$. *** indican significancia con $P < 0.001$. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

5.3.2. Parámetros productivos

Biomasa y rendimiento productivo

En la figura 5.5 se pueden observar el peso fresco de parte aérea (g/planta) así como el rendimiento productivo (kg/m²) para cada sistema y altura dentro del sistema. El peso fresco de la parte aérea siempre fue mayor para las plantas producidas por el sistema D17 (240,96 g/planta), mientras que las plantas más pequeñas se dieron en el sistema D32 (110,91 g/planta), independientemente de la altura de las baldas. Ahora bien, el ANOVA de la combinación de los factores densidad de plantación y altura de cultivo mostró diferencias significativas. En los sistemas D23 y D32, al incrementar la altura de las baldas incrementó progresivamente el peso fresco de las plantas. Mientras que en el sistema D17, se observó un incremento progresivo del peso desde la altura A1 a A3, a partir de esta altura, el peso se estabilizó siendo por igual en las plantas del intervalo de alturas A3 y A7. Analizando los datos por rendimiento productivo, se observa que el mejor sistema fue D17 con un valor de 4,10 kg/m², lo que supuso un incremento significativo del 11,11% y del 15,49% con respecto a D23 y D32, respectivamente.

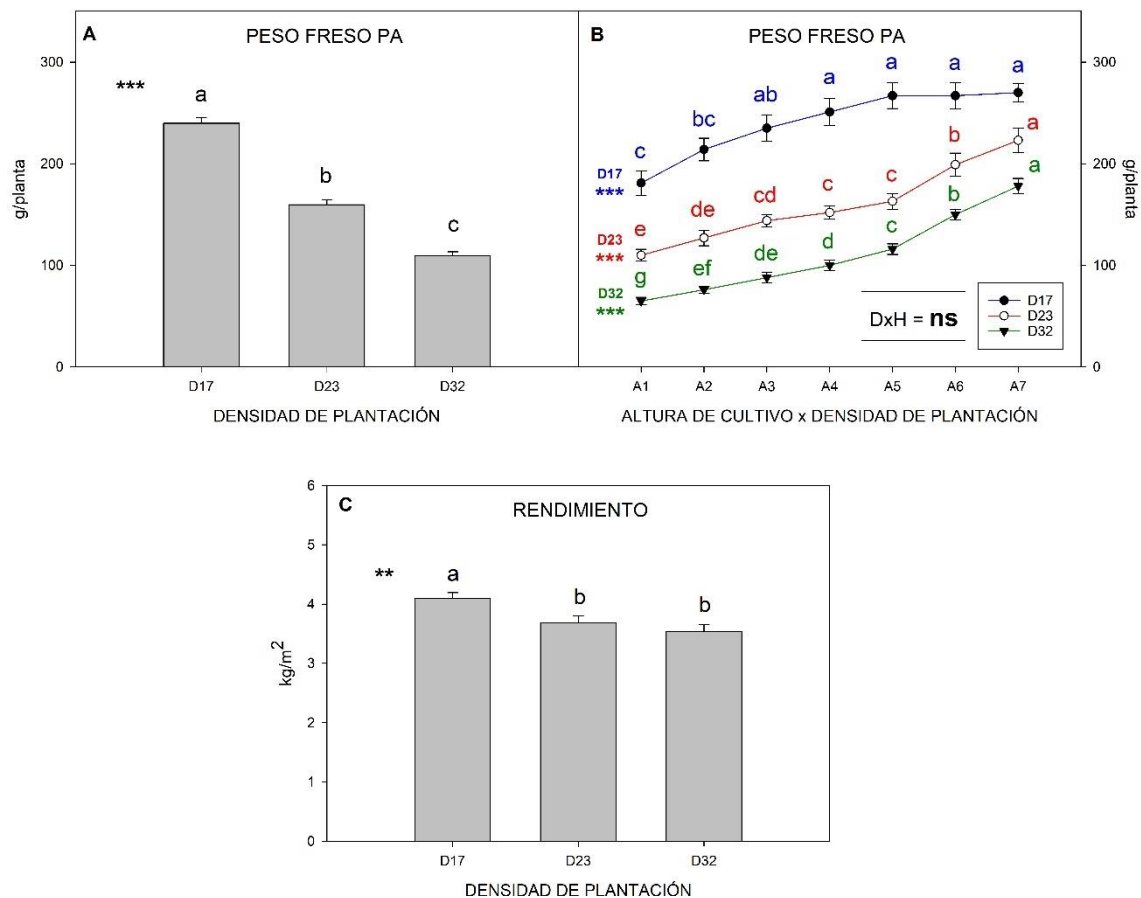


Figura 5.5. Peso fresco de parte aérea (g/planta) para D17, D23 y D32 según densidad de plantación (A) e interacción densidad de plantación y altura de cultivo (B) y rendimiento productivo (kg/m²) para D17, D23 y D32 según densidad de plantación (C). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=4$. ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

Parámetros de crecimiento vegetativo: longitud de tallo, materia seca y contenido relativo de la parte aérea

En la tabla 5.2 y tabla 5.3 se pueden observar los parámetros de crecimiento vegetativo medidos al finalizar el ensayo. El ANOVA de la longitud de tallo (cm/planta) reveló que existieron diferencias significativas solo con la altura del cultivo, debido a que las plantas de la altura A1 tuvieron una menor longitud del tallo que las del resto de alturas, no habiendo diferencias significativas entre las plantas de las alturas A2-A7. Por lo tanto, para cualquier densidad de plantación, las plantas de las alturas A2-A7 tuvieron un 29,36% más de longitud de tallo que las plantas de la altura A1. En el contenido de materia seca (g ms/planta) se observó una interacción significativa entre la densidad y la altura debido a que en el sistema D17 se dio un incremento progresivo de la materia seca desde la altura A1 a A4, a partir de esta altura, se estabilizó (A5 a A7), mientras que en D23 y D32 se observó un aumento progresivo desde A1 hasta A7. En cuanto al contenido relativo de agua (%), la altura de las baldas, y la interacción de los factores densidad de plantación x altura de cultivo no dieron diferencias significativas. En

cambio, sí se observaron diferencias significativas en la densidad. Los mayores valores se encontraron en D23, que supuso un incremento significativo con respecto a D32 y D17.

Tabla 5.2. Longitud de tallo (cm/planta), materia seca de PA (g ms/planta), y contenido relativo de agua de PA (%) para D17, D23 y D32: según densidad de plantación y altura de cultivo.

TRATAMIENTO	Longitud tallo (cm/planta)	Materia seca PA (g ms/planta)	CRA PA (%)
D17	3,44	10,47 a	95,71 c
D23	3,25	5,41 b	96,68 a
D32	3,22	4,21 c	96,16 b
ANOVA	ns	***	***
A1	2,62 b	3,92 d	96,23
A2	3,32 a	4,96 cd	96,20
A3	3,23 a	5,56 cd	96,20
A4	3,46 a	5,81 c	96,25
A5	3,37 a	6,65 bc	96,16
A6	3,45 a	7,63 ab	96,11
A7	3,57 a	8,85 a	96,12
ANOVA	***	***	ns

Los datos representan las medias con $n=4$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *** indica significancia con $P < 0.001$. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

Tabla 5.3. Longitud de tallo (cm/planta), materia seca de PA (g ms/planta), y contenido relativo de agua de PA (%) para D17, D23 y D32: según densidad de plantación e interacción densidad de plantación y altura de cultivo.

Interacción densidad por altura			
TRATAMIENTO	Longitud tallo (cm/planta)	Materia seca PA (g ms/planta)	CRA PA (%)
D17*A1	2,94	6,70 c	96,00
D17*A2	3,38	8,77 bc	96,01
D17*A3	3,54	10,51 ab	95,51
D17*A4	3,56	10,29 ab	95,75
D17*A5	3,29	12,32 a	95,59
D17*A6	3,60	11,91 a	95,64
D17*A7	3,80	12,79 a	95,50
ANOVA ALTURA D17	*	***	ns
D23*A1	2,70	3,80 e	96,78
D23*A2	2,81	4,16 de	96,78
D23*A3	3,28	4,50 cde	96,99
D23*A4	3,70	5,11 cd	96,63
D23*A5	3,39	5,36 c	96,56
D23*A6	3,16	6,60 b	96,58
D23*A7	3,69	8,30 a	96,46
ANOVA ALTURA D23	**	***	ns
D32*A1	2,39	2,40 e	96,04
D32*A2	3,59	3,23 d	95,97
D32*A3	3,02	3,34 d	96,16
D32*A4	3,26	3,64 cd	96,32
D32*A5	3,41	4,15 c	96,25
D32*A6	3,53	5,78 b	96,10
D32*A7	3,37	6,92 a	96,28
ANOVA ALTURA D32	**	***	ns
ANOVA DENSIDAD x ALTURA			
	ns	*	ns

Los datos representan las medias con $n=4$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

5.3.3. Estado nutricional de la parte aérea del cultivo.

En la figura 5.6 se da la concentración foliar de los aniones nitrato y cloruro (mg/100 mg PS) para cada sistema propuesto y altura dentro del sistema. El mayor contenido en nitratos se dio en las plantas de las densidades D23 y D32 (con valores en torno a 5 mg/100 mg PS), independientemente de la altura de las baldas. Estos valores fueron significativamente superiores al obtenido en las plantas de D17 (3,07 mg/100 mg PS), lo que supuso un incremento en torno al 63%. La combinación de los factores densidad de plantación x altura de cultivo no mostró diferencias significativas. Aunque hubo ligeras diferencias con respecto a la altura de las baldas. En D32, al aumentar la altura disminuyó significativamente el contenido de nitratos con un descenso significativo del 22,61% entre A1 y A7. En las otras dos densidades estudiadas, D17 y D23, no se observaron diferencias significativas entre alturas en cuanto al contenido de nitratos.

En cuanto a los cloruros, las plantas del sistema D32 tuvieron una mayor concentración (0,74 mg/100 mg PS) que aquellas de los otros dos sistemas. La altura también influyó en la concentración en las plantas de los sistemas de densidad D32 y D23. En estos sistemas al aumentar la altura disminuyó significativamente el contenido de cloruros mientras que en D17 no se dieron diferencias significativas entre alturas.

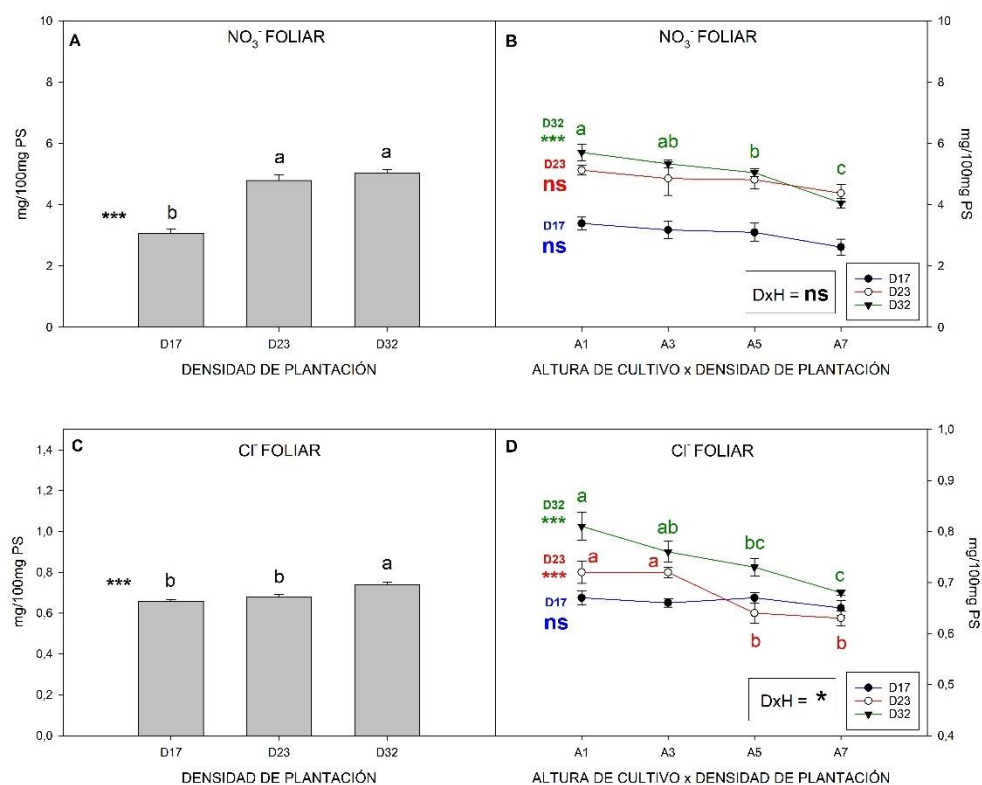


Figura 5.6. Concentración de nitratos y cloruros en hoja (mg/100mg PS) para D17, D23 y D32: según densidad de plantación (A y C) e interacción densidad de plantación y altura de cultivo (B y D). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=4$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *** indica significancia con $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

Las figuras 5.7 y 5.8 muestran el contenido foliar (mg/100mg PS) de los macronutrientes K, Ca, P, S, Mg y Na. En cuanto a la concentración de K, Ca y P, las plantas de la densidad D23 tuvieron una mayor concentración que aquellas de las densidades D17 y D32. Las plantas D23 tuvieron una concentración de K, Ca y P de 10,36, 2,06, y P 1,21 (mg/100mg PS), respectivamente (Fig. 5.7). La altura también influyó en la concentración de algunos de estos nutrientes: Ca para la densidad 23, y, P para la densidad 23 y 17. En todos los casos en los que se observaron diferencias se siguió un mismo modelo de respuesta. El aumento de altura conllevó una disminución del contenido mineral en hoja.

En la concentración de S, Mg y Na las plantas cultivadas en el sistema D23 tuvieron una mayor concentración que las de los sistemas de densidad D17 y D32. Estas diferencias fueron significativas para Mg y Na. En estos dos últimos elementos también se observaron diferencias con la altura de las baldas, siguiendo el modelo de respuesta comentado anteriormente.

El estudio del contenido foliar de los micronutrientes B, Cu, Mn, Mo, Fe y Zn (Fig. 5.9 y 5.10) presentó resultados muy dispares según el micronutriente estudiado. Al estudiar las densidades propuestas, B y Mn presentaron las mayores concentraciones en D32, Cu y Fe en D23 y Zn en D17 y D32, mientras que en el contenido foliar de Mo no se encontraron diferencias significativas entre las tres densidades. El análisis de la combinación de los factores densidad de plantación y altura de cultivo reveló que B, Cu, Mn y Mo no presentaron diferencias significativas, mientras que Fe y Zn sí. El estudio de las alturas dentro de cada sistema propuesto reveló un comportamiento muy dispar, no existiendo una tendencia clara en los diferentes micronutrientes estudiados.

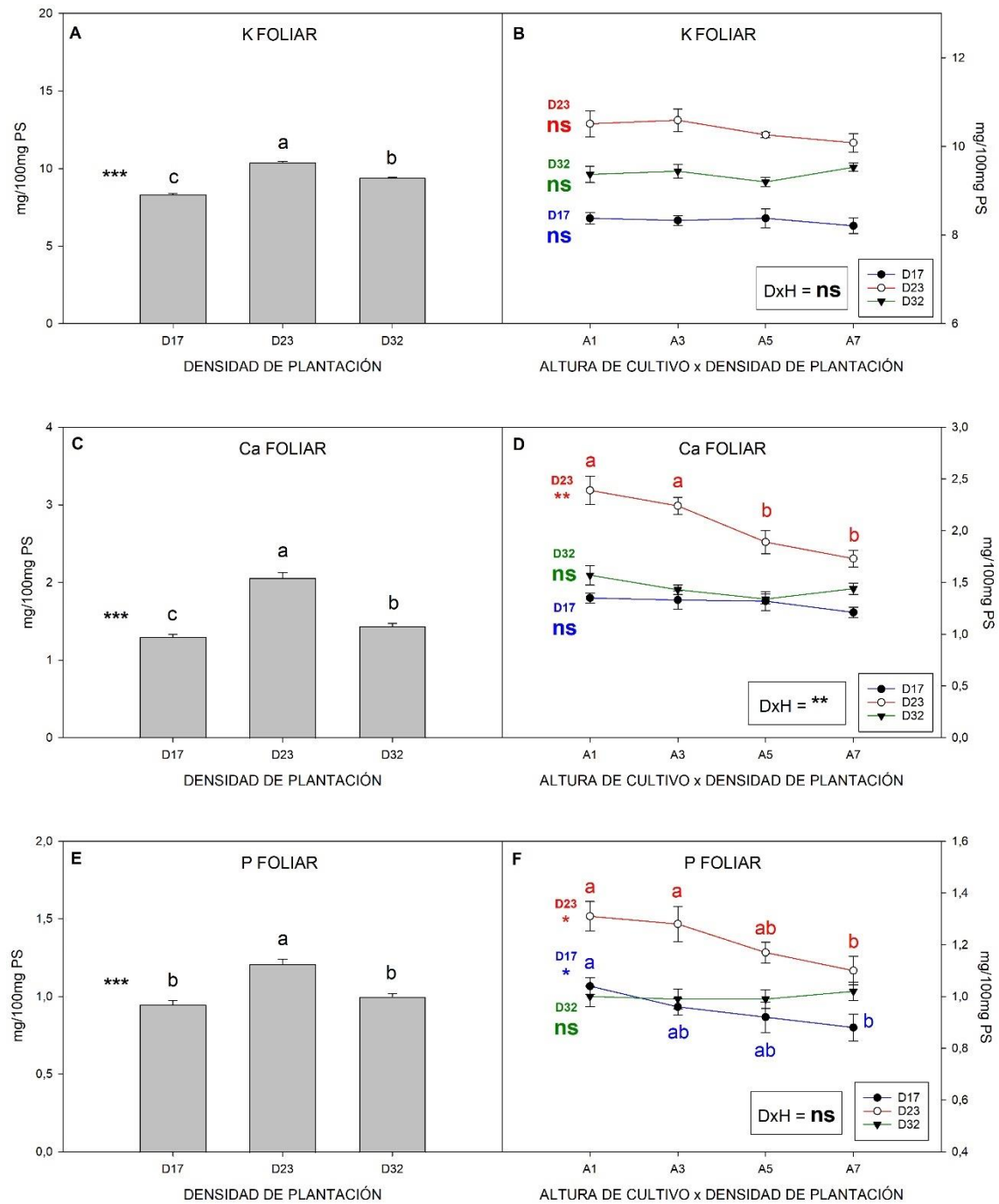


Figura 5.7. Concentración de potasio, calcio y fósforo en hoja (mg/100mg PS) para D17, D23 y D32: según densidad de plantación (A y B) e interacción densidad de plantación y altura de cultivo (C y D). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=4$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

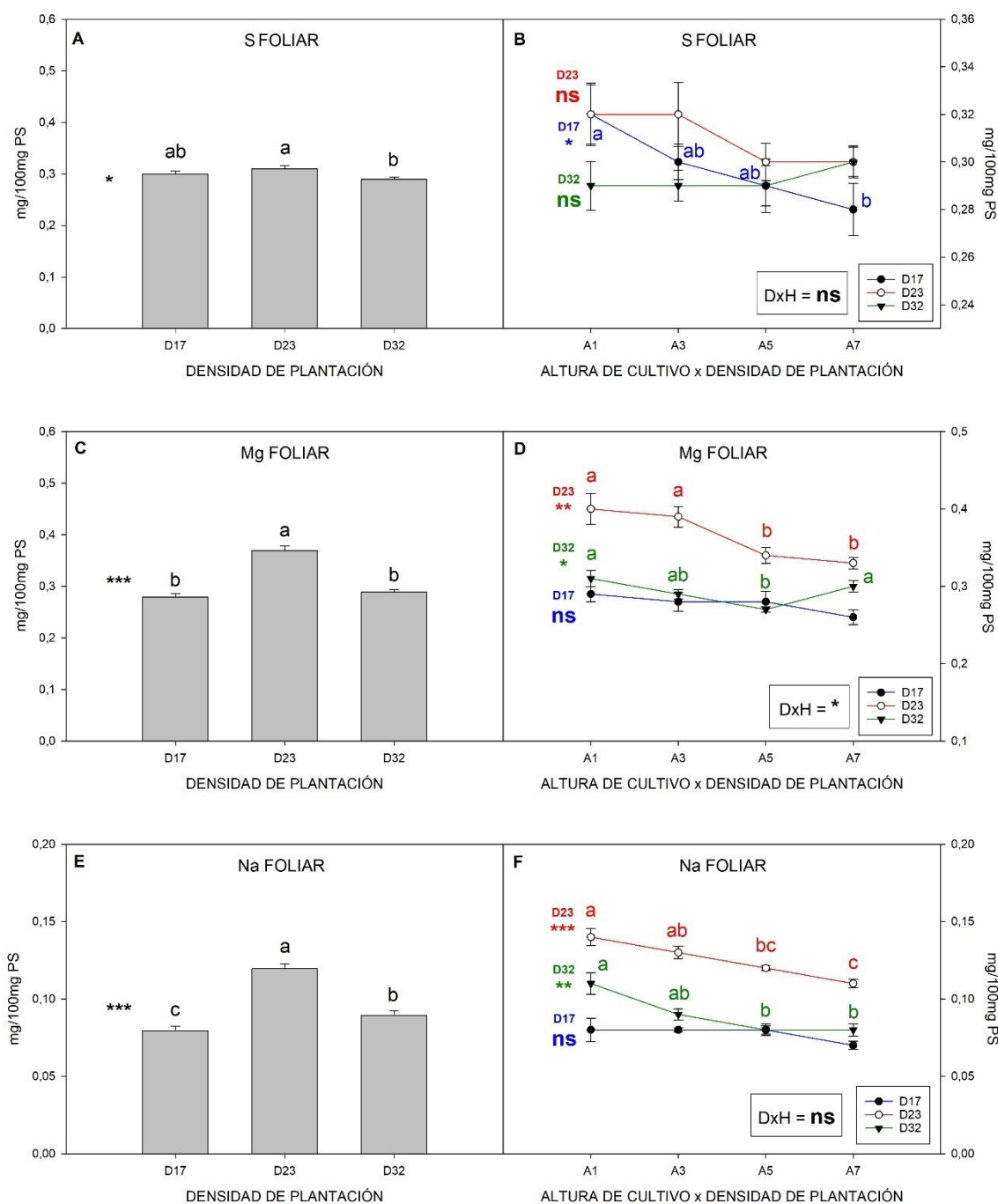


Figura 5.8. Concentración de azufre, magnesio y sodio (mg/100mg PS) para D17, D23 y D32: según densidad de plantación (A y B) e interacción densidad de plantación y altura de cultivo (C y D). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=4$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

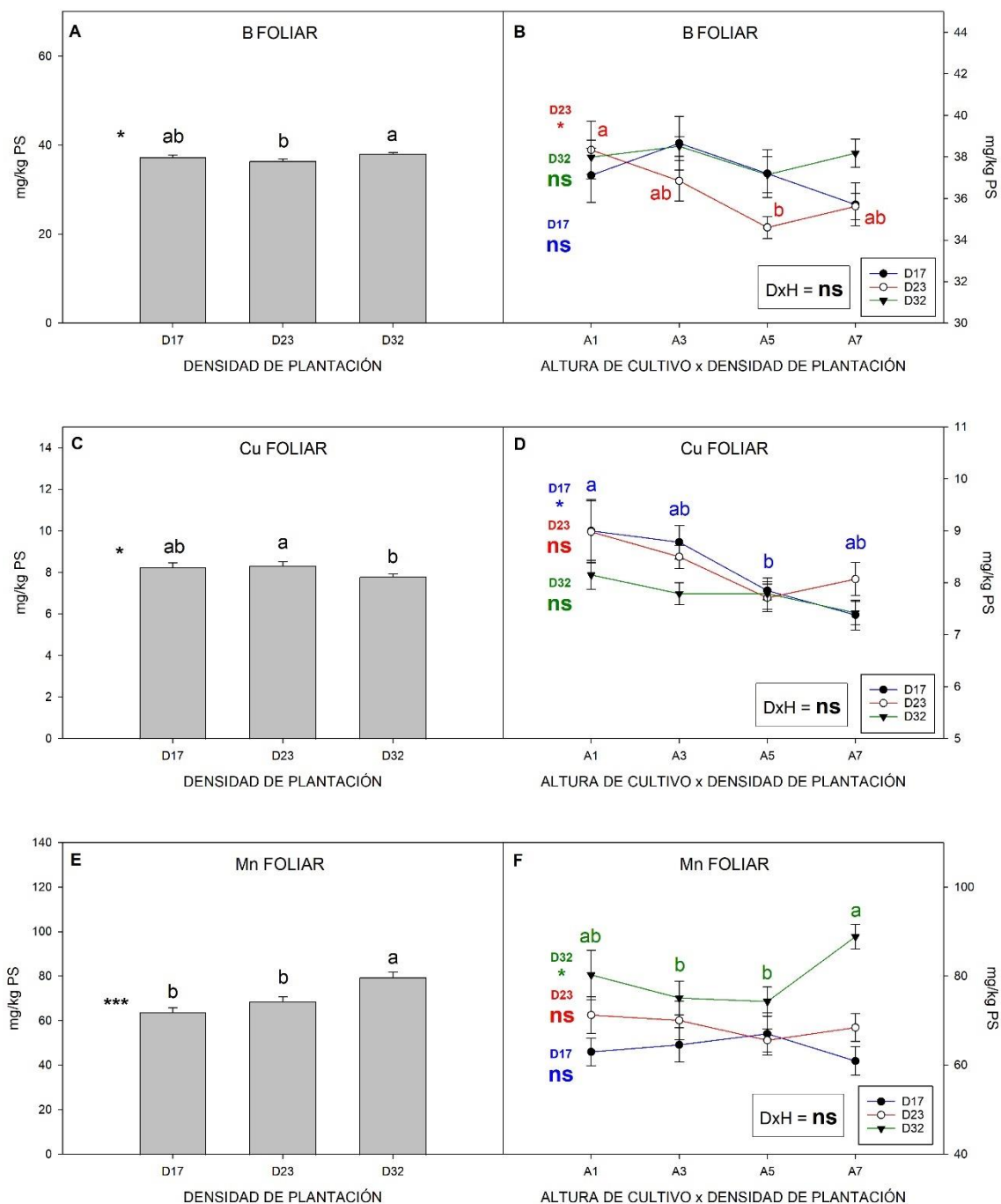


Figura 5.9. Concentración de boro, cobre y manganeso en hoja (mg/100mg PS) para D17, D23 y D32: según densidad de plantación (A y B) e interacción densidad de plantación y altura de cultivo (C y D). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=4$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que * y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

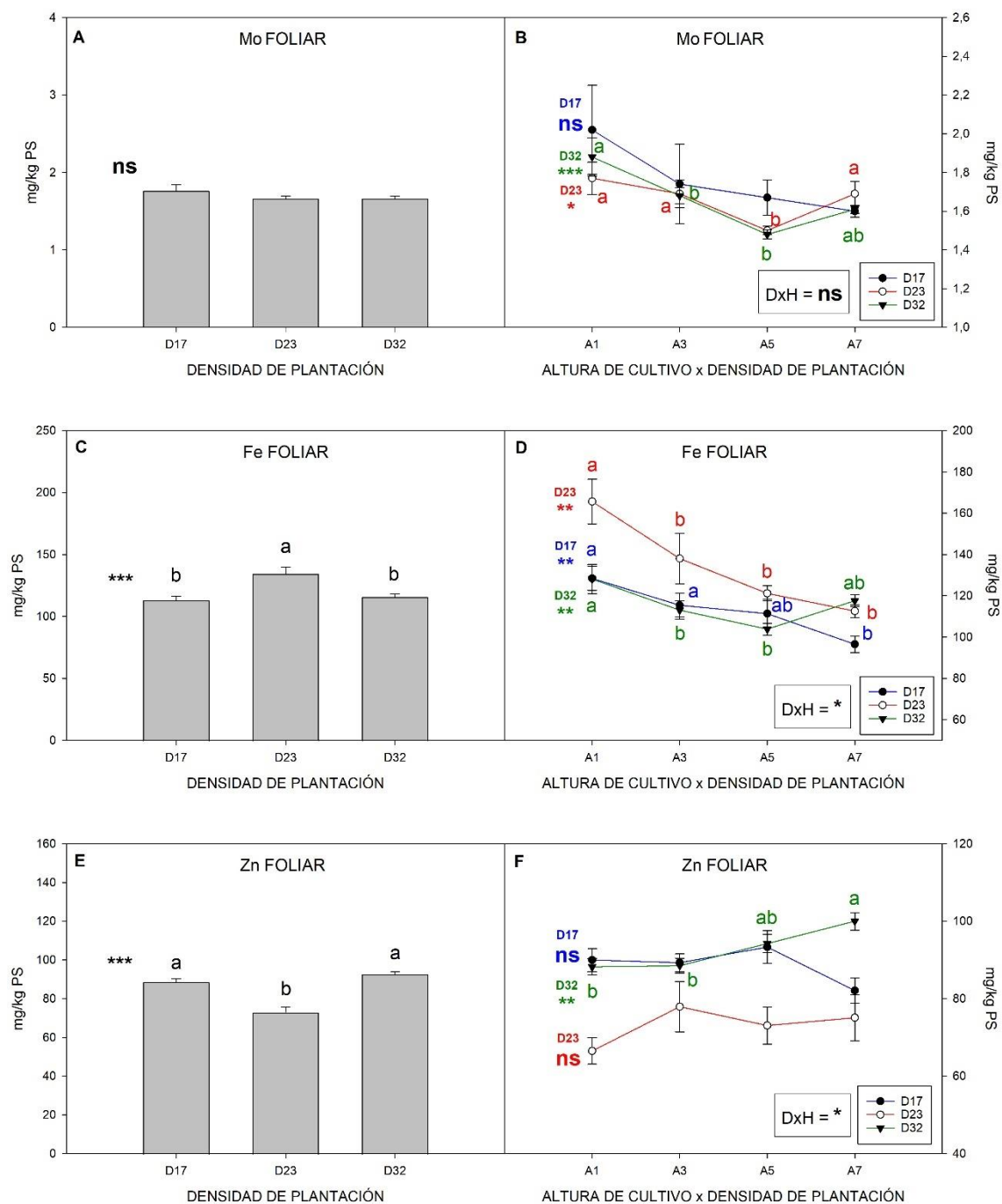


Figura 5.10. Concentración de molibdeno, hierro y zinc en hoja (mg/100mg PS) para D17, D23 y D32: según densidad de plantación (A y B) e interacción densidad de plantación y altura de cultivo (C y D). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=4$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

5.3.4. Parámetros de calidad.

Distribución de la producción por peso de las lechugas

Se estudió la distribución de las lechugas por su peso para conocer la homogeneidad de la cosecha en los diferentes tratamientos estudiados. Se establecieron tres intervalos de peso C1: <145 g, C2: 146 a 254 g y C3>255 g, y se calculó que porcentaje de la producción se encontraba en cada intervalo (tabla 5.4). El tratamiento D17 fue el que mayor porcentaje de plantas de mayor peso (C2 y C3) arrojó de las tres densidades estudiadas con un 48,21% de su producción por encima de los 255 g. Esto se contrapone con lo ocurrido en D32, en la que solo un 0,51% de su producción se encuentra por encima de los 255 g, mientras que la mayor parte (78,57%) es una producción de lechugas de pequeño peso (menos de 145g). El sistema D23 produce principalmente en la categoría C1 (41,07 %) y C2 (52,68 %).

Tabla 5.4. Distribución de la producción de lechuga por tamaño para D17, D23 y D32: según densidad de plantación (A), altura de cultivo (B) e interacción densidad de plantación y altura de cultivo (C, D y E).

TRATAMIENTO	C1: <145g (%)	C2: 146 A 254g (%)	C3>255g (%)
D17	5,36	46,43	48,21
D23	41,07	52,68	6,25
D32	78,57	20,92	0,51

Los datos representan el porcentaje de lechuga producida en cada intervalo de peso fresco: I1: <145 g, I2: 146 A 254 g e I3>255 g. Con n=112.

Color.

En las tablas 5.5 y 5.6 se pueden observar los diferentes parámetros de color medidos en hojas: luminosidad L (esc. 0-100), Cromaticidad a y b (esc. 0-100), Saturación C (esc. 0-100) y Ángulo Hue (grados). En cualquiera de los parámetros estudiados no se observaron diferencias significativas en la interacción densidad x altura. Sin embargo, sí que se observaron diferencias en los factores de densidad y altura por separado. La comparación de parámetros de color en función de la densidad de plantación mostró que L, C y “b” aumentaron según el siguiente orden D23>D32>D17, mientras que los parámetros “a” y Hue fueron mayores en las plantas de D17 que en las plantas de los otros dos tratamientos. Al estudiar cómo afecta la altura de cultivo a estos parámetros se observó que en el parámetro “a” no se dieron diferencias significativas, mientras que en el resto sí. Los mayores valores de Hue se dieron en las plantas cultivadas en las alturas más altas, mientras los de L, C y “b” en las alturas más bajas. Esto hizo que las plantas D23 altura A1 tuvieran los valores más altos de L, “b” y “c”, y, las plantas de D17 altura A7 los valores más altos de HUE.

Tabla 5.5. Parámetros que determinan el color en hoja: Luminosidad (esc. 0-100), Cromaticidad a y b (esc. 0-100), Saturación (esc. 0-100) y Ángulo Hue (grados) en hoja para D17, D23 y D32: según densidad de plantación y altura de cultivo.

TRATAMIENTO	L	a	b	C	Áng. Hue
D17	53,68 c	-19,05 a	35,20 c	40,03 c	118,43 a
D23	60,19 a	-21,56 c	41,74 a	46,87 a	117,42 b
D32	58,37 b	-20,08 b	38,93 b	43,80 b	117,29 b
ANOVA	***	***	***	***	***
A1	59,42 a	-20,64	39,94 a	44,96 a	117,39 cd
A2	58,86 a	-20,31	39,85 a	44,51 ab	117,18 d
A3	56,95 abc	-19,44	37,67 ab	42,40 ab	117,37 cd
A4	58,85 a	-20,70	39,61 a	44,70 ab	117,65 bc
A5	58,06 ab	-20,54	39,20 ab	44,24 ab	117,72 bc
A6	56,01 bc	-19,90	37,50 ab	42,44 ab	117,91 ab
A7	55,10 c	-19,86	37,04 b	42,03 b	118,16 a
ANOVA	**	ns	*	*	***

Los datos representan las medias con $n=4$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

Tabla 5.6. Parámetros que determinan el color en hoja: Luminosidad (esc. 0-100), Cromaticidad a y b (esc. 0-100), Saturación (esc. 0-100) y Ángulo Hue (grados) en hoja para D17, D23 y D32: según la interacción densidad de plantación y altura de cultivo.

Interacción densidad por altura					
TRATAMIENTO	L	a	b	C	Áng. Hue
D17-A1	53,89	-19,27	35,57	40,46	118,47 ab
D17-A2	55,01	-19,48	36,53	41,40	118,13 ab
D17-A3	52,53	-18,50	34,83	39,44	118,01 b
D17-A4	53,74	-18,76	34,79	39,54	118,37 ab
D17-A5	54,11	-19,18	35,24	40,12	118,59 ab
D17-A6	53,01	-19,22	34,91	39,78	118,65 ab
D17-A7	53,50	-18,97	34,57	39,44	118,78 a
ANOVA ALTURA	ns	ns	ns	ns	*
D17					
D23-A1	63,15 a	-22,05	43,15 ab	48,46 ab	117,09 c
D23-A2	61,83 a	-22,09	44,37 a	48,73 ab	116,95 c
D23-A3	60,09 ab	-20,68	40,46 abc	45,44 ab	117,18 c
D23-A4	63,07 a	-22,96	44,27 a	49,87 a	117,44 bc
D23-A5	60,25 ab	-21,66	41,90 abc	47,17 ab	117,34 c
D23-A6	56,36 b	-20,43	38,69 c	43,76 b	117,83 ab
D23-A7	56,55 b	-22,05	39,37 bc	44,64 b	118,11 a
ANOVA ALTURA	**	ns	*	*	**
D23					
D32-A1	60,44 a	-20,61	40,60	45,53	116,94 d
D32-A2	59,35 a	-19,78	39,16	43,87	116,78 d
D32-A3	57,67 ab	-19,27	37,71	42,35	117,10 cd
D32-A4	59,36 a	-20,52	39,70	44,70	117,35 bc
D32-A5	59,07 a	-20,68	39,93	44,92	117,44 bc
D32-A6	57,52 ab	-19,99	38,30	43,21	117,54 ab
D32-A7	55,19 b	-20,61	37,12	42,03	117,84 a
ANOVA ALTURA	*	ns	ns	ns	**
D32					
ANOVA DENSIDAD x ALTURA					
	ns	ns	ns	ns	ns

Los datos representan las medias con $n=4$. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

Clorofilas SPAD.

La figura 5.11 presenta el contenido en clorofilas (uds. SPAD) de las hojas de las lechugas para cada sistema y altura dentro del sistema. El mayor contenido en clorofilas se encontró en el sistema D17 (2,70 uds. SPAD), disminuyendo significativamente en un 22 % y 35 % en las lechugas procedentes de los sistemas D23 (2,11 uds. SPAD) y D32 (1,75 uds. SPAD), respectivamente. Al analizar las alturas de cultivo en cada una de las densidades propuestas se observó que en D17 y D23 se produjo una subida significativa en A7 con respecto al resto de alturas (A1-A6) que obtuvieron valores similares estadísticamente, mientras que en D32 hubo un incremento en el contenido de clorofilas con el aumento de altura de cultivo, registrándose los valores más altos en A6 y A7. El ANOVA no mostró diferencias significativas entre la densidad x altura. Por lo tanto, la mayor concentración de clorofilas se dio en las plantas del sistema D17 altura A7.

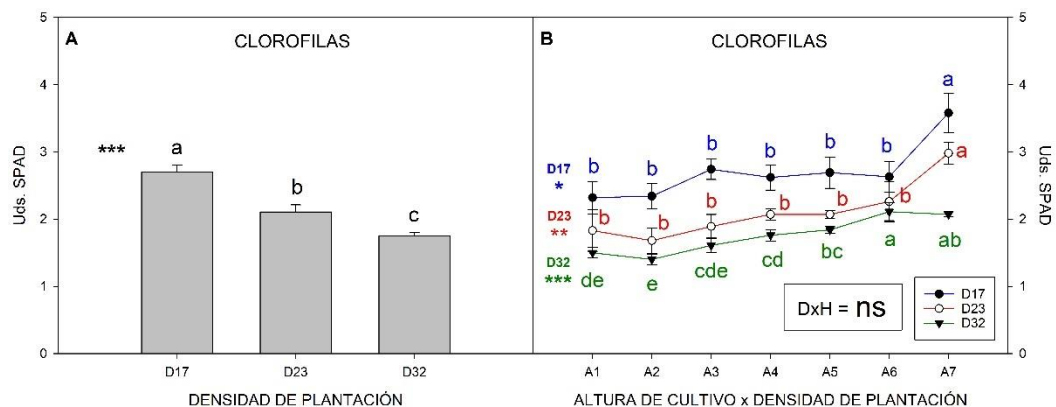


Figura 5.11. Contenido de clorofilas (uds. SPAD) en hoja para D17, D23 y D32: según densidad de plantación (A) e interacción densidad de plantación y altura de cultivo (B). Los datos representan las medias $\pm$ SE con $n=4$, ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

5.3.5. Eficiencia en el uso de la luz.

Los resultados del estudio de la eficiencia en el uso de la luz ($\text{g ms/MJ} \cdot \text{m}^2$) se muestran en la figura 5.12. Este parámetro hace referencia a los gramos de materia seca de lechuga que se producen por cada MJ m^{-2} que llega al sistema de cultivo. La mayor eficiencia se produjo, independientemente de la altura del cultivo, en D17 ($0,036 \text{ g ms/MJ} \cdot \text{m}^2$), disminuyendo significativamente conforme se aumentó la densidad: un 48,16% para D23 ($0,024 \text{ g ms/MJ} \cdot \text{m}^2$) y un 4,05% para el sistema D32 ($0,019 \text{ g ms/MJ} \cdot \text{m}^2$). En cuanto al estudio de las alturas de cultivo en cada una de las densidades propuestas siempre se cumplió que $A7 > A1$, dando valores intermedios en el resto de alturas. El análisis de la combinación de los factores densidad de plantación x altura de cultivo no reveló diferencias significativas.

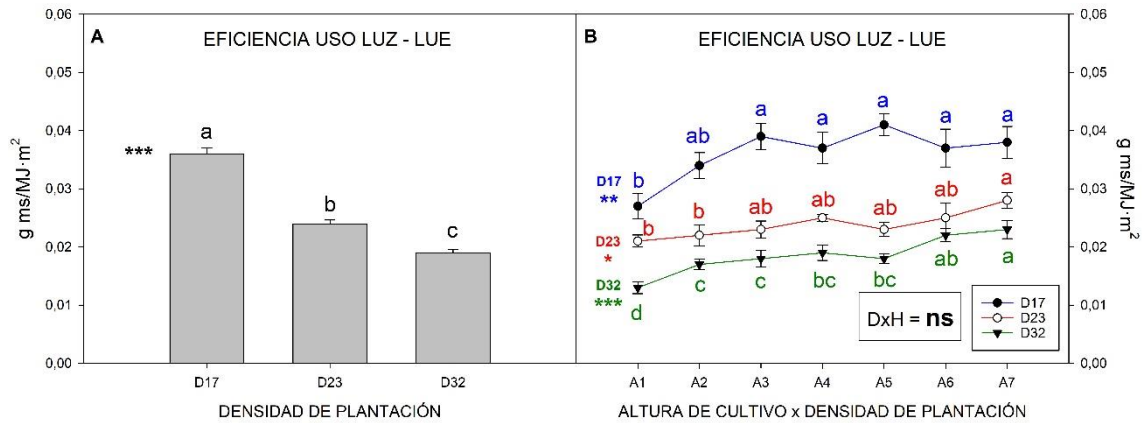


Figura 5.12. Eficiencia en el uso de la luz -LUE- (g ms/MJm²) para D17, D23 y D32: según densidad de plantación (A) e interacción densidad de plantación y altura de cultivo (B). Los datos representan las medias $\pm$ SE con n=4. ns indica no significancia con $P \geq 0.1$, mientras que *, ** y *** indican diferentes grados de significancia con $0.1 > P \geq 0.01$, $0.01 > P \geq 0.001$ y $P < 0.001$ respectivamente. Letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para $p < 0,05$, según el test de comparación múltiple de Duncan para cada grupo de datos.

5.3.6. Relación entre parámetros productivos y radiación incidente.

En la figura 5.13 se muestra la relación entre radiación incidente acumulada (MJ/m²) y el peso fresco de la parte aérea (g/planta) y el peso seco de la parte aérea (g ms/planta). El aumento de la radiación incidente acumulada por cada lechuga produjo un aumento general del peso fresco (Fig. 5.13A) y del peso seco (Fig. 5.13B) de la parte aérea por lechuga. Esta respuesta fue cuadrática y siempre mayor para el sistema D17 seguido del D23 y D32.

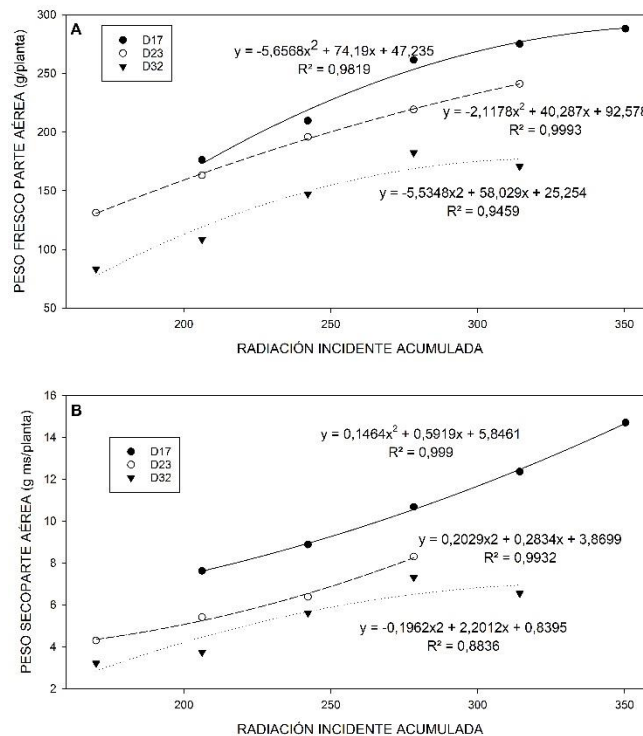


Figura 5.13. Relación entre el peso fresco medio de los brotes (A) y el peso seco (B) con la radiación incidente acumulada para D17, D23 y D32: Los datos representan las medias con n=4.

5.4. Discusión

A la hora de diseñar estructuras verticales en un cultivo de lechuga en invernadero es necesario tener en cuenta la densidad de plantación y altura de cultivo. Estos factores no solo determinan el número de plantas cultivadas por superficie si no también el peso fresco y la calidad de la cosecha ya que la incidencia de luz sobre las plantas tiene una influencia clara en estos parámetros. Al aumentar la densidad de plantación y descender en altura se espera que el crecimiento disminuya como efecto de una reducción de la radiación incidente. Por lo tanto, este experimento tuvo el objetivo de optimizar los parámetros de densidad de plantación y altura en estos sistemas. Para desarrollar este objetivo se dispuso de un diseño hidropónico vertical cerrado con tres densidades de plantación (D17, D23 y D32; 17, 23 y 32 plantas/m² respectivamente) y siete alturas de cultivo (A1, A2, A3, A4, A5, A6 y A7). Y, en estos sistemas se evaluó el rendimiento agronómico, el estado nutricional de las plantas, y, la calidad de la cosecha.

Desde el punto de vista productivo, el mejor sistema fue D17, (el que presentó menor número de plantas por m²) ya que obtuvo los mayores valores de peso fresco de parte aérea (240,96 g/planta), lo que dio como resultado el mayor rendimiento por unidad de superficie (4,10 kg/m²). Las plantas más pequeñas se dieron en el sistema D32 (densidad con mayor número de plantas por m²) con un valor medio de 110,91 g/planta, un 54% menor que las cultivadas en D17. Los incrementos de rendimiento por unidad de superficie en D17 fueron del 11,29 y del 15,41% sobre los otros dos tratamientos, D23 y D32. Por lo tanto, en estos sistemas el mayor número de plantas por m² no compensa los efectos perjudiciales que tiene la falta de luz sobre las plantas. Uno de los inconvenientes que si se dan en las plantas de los sistemas D17 y D23 es la heterogeneidad del peso fresco de los frutos como consecuencia de la luz incidente que llega a cada una de las alturas. Esto hace que en las plantas cultivadas en el sistema D17 el 46 % sean lechugas con peso entre 146-254 gr y el 48.21% son lechugas de peso mayor de 255 gr. En general se siguió la tendencia de a menor altura menor peso fresco de parte aérea, si bien este tratamiento D17 a partir de la altura A4 se estabilizó el peso fresco, no habiendo diferencias entre A4, A5, A6 y A7. En D23 y D32, el peso fresco de parte aérea disminuyó conforme disminuyó la altura del cultivo, siendo las alturas superiores las que mayores valores de peso fresco arrojaron.

La radiación solar es necesaria para el crecimiento de las plantas, existiendo una estrecha relación entre la intercepción de la luz y el desarrollo de un cultivo (Kiniry, 1994). La producción de biomasa aérea puede estar relacionada con la cantidad de luz interceptada y la eficiencia de su uso. La intensidad de la luz es una de las principales variables que afectan la calidad y el rendimiento de la lechuga (Ferentinos y col., 2000; Ouzounis y col., 2015; Son y col., 2013) y está bien documentado que el rendimiento de la lechuga aumenta con el incremento de la intensidad de la luz (Frantz y Bugbee, 2005). En los sistemas de cultivos vertical, las altas densidades de plantación suponen una intensa competencia de las plantas por la luz (Pettersen y

col., 2010). En nuestro ensayo la radiación incidente acumulada disminuyó conforme se aumentó la densidad de plantación y conforme disminuyó la altura de cultivo, y, esto fue correlacionado con los pesos y los rendimientos agronómicos comentados anteriormente. Estos resultados de disminución de rendimiento agronómico con la disminución de altura de cultivo fueron similares al encontrado por Touliatos y col. (2016) en su experimento de cultivo hidropónico vertical de lechuga en columnas, en el que también se produjo un descenso significativo de los valores de radiación conforme se disminuía la altura del cultivo y que afectaron al peso fresco de las plantas. Por otro lado, la disminución de producción con la disminución de altura se debe al efecto de sombreado que plantas de alturas superiores ejercieron sobre plantas de alturas inferiores (Linsley-Noakes y col., 2006), tal como observaron Liu y col. (2005), que en consonancia con nuestros resultados registraron disminuciones en la producción cuando aumentaron la densidad de estructuras de cultivo vertical en columnas. Otros ensayos también estudiaron como influye la altura en la producción de lechuga en estructuras verticales. Touliatos y col. (2016) implantaron un cultivo vertical bajo invernadero en columnas con lechuga tipo Little, en el que el peso fresco de las lechugas disminuyó conforme se bajó la altura del cultivo, de manera que en zonas inferiores se produjo un 43% menos de peso fresco que en zonas superiores. Liu y col. (2005) propusieron un ensayo de cultivo hidropónico vertical bajo invernadero en columnas con espinaca de Okinawa (*Gynura bicolor*), en el que observaron que la producción de cada hilera de cultivo disminuyó significativamente al pasar de la parte superior a la inferior, de forma que en el nivel superior de cultivo se obtuvieron plantas con 5191 g de media, descendiendo el peso fresco conforme se disminuyó la altura de cultivo hasta los 282 g/planta que se alcanzaron en la altura de cultivo más baja. Baixauli y sus colaboradores pusieron en marcha recientemente (2020-2021) en el Centro de Experiencias Cajamar en Paiporta (Valencia) una experiencia similar (datos no publicados) a la propuesta en nuestro ensayo. Ensayaron un cultivo vertical bajo invernadero con un sistema hidropónico NFT que permitió una densidad de hasta 30 plantas/m². En sus ensayos utilizaron pack choi, menta, espinaca y tres tipos de lechuga (Little gem, Hoja de roble y Salanova tipo Crispy). En el caso de las lechugas y, desde el punto de vista productivo, la experiencia presentó unos resultados similares a los nuestros, en cuanto que, a menor alturas de cultivo, menor fue la producción comercial obtenida. En lechuga del tipo “little gem” consiguieron un rendimiento de 8 kg/m², del que aproximadamente un 50 % de dicha producción se consideró como destrío, especialmente en las hileras inferiores de la estructura. En lechuga hoja de roble el rendimiento comercial fue de 3,64 kg/m² en las alturas de cultivo más altas, mientras que, en las más bajas, se presentaron algunos problemas que hicieron considerar la producción de 2,1 kg/m² como destrío. En el caso de la lechuga tipo salanova crispy, se obtuvo un rendimiento total de 5,62 kg/m², considerando como comercial toda la producción incluso en las alturas más bajas del cultivo, aunque en estas alturas bajas se obtuvieron pesos inferiores con respecto a las altas.

Desde el punto de vista de la calidad, D17 fue el tratamiento que ofreció lechugas de mayor calidad debido fundamentalmente al alto número de lechugas grandes (>255 g) y baja número de lechugas pequeñas (<145 g), su menor contenido en nitratos y su mayor contenido en clorofilas. El sistema D17, densidad más productiva en términos absolutos, también fue la densidad que mejor calidad de lechuga ofreció en la producción en cuanto a su homogeneidad en la producción, con el mayor porcentaje de plantas grandes producidas (plantas de peso superior a 255 g) y que resultaron un 48,21% sobre la producción total, muy superior al 6,25 y 0,51% que produjeron D23 y D32. Además, D17 obtuvo una buena producción de plantas de tamaño medio (plantas de peso entre 146 y 254 g) con un 46,43% de su producción total y, por otro lado, tuvo una escasa producción de plantas pequeñas (plantas de peso inferior a 145 g) con un 5,36%. D32 fue el peor tratamiento en cuanto a homogeneidad de producción siendo la mayor parte de su producción (78,57 %) de plantas menores de 145 g.

En cuanto los parámetros de calidad de color y clorofilas los tres tratamientos de cada uno de los sistemas tuvieron valores estándar, por lo que los tratamientos aplicados no afectaron negativamente a la calidad de las lechugas. Aunque las lechugas del sistema D17 tuvieron los valores más altos de estos parámetros. También se observó una tendencia similar a la producción con la altura. En cada densidad se detectaron los mayores contenidos en las alturas superiores.

En cuanto al contenido de nitratos en hoja, las densidades estudiadas cumplieron con el *REGLAMENTO (UE) N. 1258/2011 DE LA COMISIÓN, de 2 de diciembre de 2011 que modifica el Reglamento (CE) n. 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de nitratos en los productos alimenticios*, que establece el límite máximo de nitratos en hojas de lechuga en 5.000 mg NO₃⁻/kg PF para el periodo de cultivo estudiado. El menor contenido en nitratos se detectó en D17 con 2691,34 mg/kg PF, incrementándose conforme se aumentó la densidad con 3157,99 y 3871,31 mg/kg PF para D23 y D32, respectivamente. Al analizar detalladamente el contenido de nitratos en hoja en cada una de las alturas tampoco se detectaron que se sobrepasaran los límites, y, al contrario, que pasaba con la densidad, un aumento en altura se tradujo en una disminución de nitratos en hoja. Así, la altura que mayor concentración de nitratos obtuvo fue la A1 de D32 (menor altura de cultivo de mayor densidad de plantación) con 4.545,25 mg /kg PF, casi 500 mg/kg PF por debajo del límite legal establecido. Por lo tanto, la concentración de nitratos en las hojas de lechugas estuvo estrechamente relacionada con la radiación acumulada. La lechuga tiene una tendencia elevada a la acumulación de nitratos en hoja, por lo que su consumo puede provocar importantes aportes de nitratos en la dieta humana (Dapoigny y col., 2000). Diferentes estudios han puesto de manifiesto a lo largo de las últimas décadas que la radiación solar y el suministro de nitrógeno son los principales factores que influyen en el contenido de nitratos de la materia fresca (Gaudreau y col., 1995; Gunes y col., 1994). El cultivo en invernaderos hace que la falta de luz solar directa provoque que los cultivos no metabolicen correctamente los nitratos. Tratando

concretamente de factores ambientales, la radiación luminosa es el más importante en cuanto a la acumulación de nitratos: la reducción de la intensidad luminosa disminuirá la velocidad del proceso fotosintético favoreciendo así la acumulación de nitratos (Burns y Lee, 2005; Lillo, 1994). Por lo tanto, una mejor comprensión de los efectos de los factores ambientales en la acumulación de nitratos en las hojas de lechuga es esencial para la gestión del cultivo que conduce a una producción aceptable (Dapigny y col., 2000). En este sentido, son diversos los estudios que ya demostraron esta relación. Por ejemplo, Dapigny y col. (2000), realizaron dos experiencias (otoño y verano) en las que propusieron la combinación de dos niveles de suministro de N y dos niveles de intensidad de radiación luminosa. Ensayaron una radiación normal y una radiación reducida en un 60 % mediante sombreado artificial, llegando a la conclusión que, a mismo suministro de N, siempre se obtuvo una menor concentración de nitratos en hoja en los tratamientos de mayor radiación. En este mismo sentido, Burns y Lee (2005) realizaron una serie de ensayos con lechuga Butterhead en invernadero cultivada en suelo, en los que estudiaron en qué grado diferentes intensidades luminosas combinadas con diferentes suministros de abono nitrogenado afectaron a la acumulación de nitrato en hoja. Observaron cómo se acumuló nitrato ante una reducción de la radiación solar, bien por la estación de cultivo o cuando las lechugas se veían sometidas al sombreado debido al aumento de la densidad. Por otro lado, McCall y Willumsen (2016) estudiaron el efecto de la disponibilidad de nitrógeno y de la luz suplementaria de bajo nivel sobre el crecimiento y el contenido de nitrato de lechuga Butterhead en invernadero y cultivada en suelo, concluyendo que la luz suplementaria aumentó en gran medida el crecimiento de la planta dando lugar a una cosecha más precoz y que, cuando se cosechó con pesos frescos similares, el contenido de nitrato de la planta se redujo significativamente por la luz suplementaria, de forma que intensidades bajas de luz produjeron una acumulación de 4.580 mg NO_3^-/kg PF en la hoja de las lechugas, mientras que con intensidades altas de luz acumularon 4.216 NO_3^-/kg PF. Liu y col. (2005) tuvieron unos resultados similares en cuanto a las alturas en su estudio de cultivo vertical de espinaca de Okinawa (*Gynura bicolor*) en columnas, encontrando los menores contenidos de nitrato en plantas del nivel superior de cultivo y los mayores contenidos en plantas del nivel inferior de cultivo.

En el estudio del estado nutricional de nuestro ensayo nos reveló que, en general, todos las densidades y alturas estudiadas están dentro de los límites de normalidad establecidos por Kim y col. (2016) y USDA (2021), salvo el Mo y Zn, que se encuentran por encima de este rango de normalidad. En el caso del N total se sobrepasa el límite en menos de 1 mg/100mg PS en cada una de las densidades y alturas, el Zn se sobrepasa de 7 a 26 mg/kg PS (un incremento del 40% más de lo normal) y el Mo en algo más de 1 mg/kg PS (un incremento del 350% más de lo normal). Además, destacan los resultados obtenidos para los macronutrientes K, Ca, P y Mg. Para estos elementos, las concentraciones más bajas siempre aparecieron en D17, densidad más baja de las

propuestas en el ensayo. Este hecho puede estar motivado porque de la producción en esta densidad resultaron las lechugas de mayor peso fresco, por lo que probablemente se produjo un efecto dilución de estos macronutrientes en la lechuga.

5.5. Conclusiones.

1. Las estructuras de cultivo vertical utilizadas en este experimento crearon un gradiente de radiación de manera que aumentó la radiación tanto al disminuir la densidad de plantación como al aumentar la altura de las baldas.
2. El gradiente de radiación de las estructuras verticales afecta al rendimiento agronómico del cultivo al afectar al peso fresco de las plantas. El mejor sistema productivo, peso fresco por m², fue el D17 ya que tuvo la más alta radicación acumulada. Por lo tanto, las plantas situadas en estructuras más densas o en posiciones con menos luz tienen un rendimiento agronómico bajo.
3. El sistema D17 es la mejor disposición vertical ya que garantiza un buen equilibrio entre el rendimiento y la calidad, y su puesta en marcha y manejo sería menos costosa económicamente que D23 y D32.
4. Desde el punto de vista nutricional, todos los tratamientos empleados estuvieron dentro del rango de normalidad para lechuga excepto en los casos del Zn (40% más de lo normal) y Mo (350% más de lo normal).
5. Ninguno de los manejos ensayados en los tres sistemas de cultivo superó la concentración de nitrato en las lechugas, manteniéndose los valores umbrales exigidos por la Unión Europea. La disminución de densidad en D17 incluso disminuyó significativamente el contenido de nitratos, poniendo de manifiesto la relación entre la intensidad luminosa y la concentración de nitratos en las hojas.
6. Los sistemas de cultivo vertical constituyen una alternativa viable a los sistemas hidropónicos horizontales al optimizar la eficiencia del área cultivable, produciendo así más cosecha por unidad de superficie. Se podría aumentar aún más el rendimiento incorporando un apoyo de iluminación artificial para mitigar el déficit que produce el efecto de sombreo en altas densidades.

5.6. Referencias bibliográficas.

- Burns, I. G., y Lee, A. (2005). Nitrate Accumulation in Protected Lettuce. 271–278.
- Dapoigny, L., Tourdonnet, S. De, Roger-estrade, J., Dapoigny, L., Tourdonnet, S. De, Roger-estrade, J., y Jeuffroy, M. (2000). Effect of nitrogen nutrition on growth and nitrate accumulation in lettuce (*Lactuca sativa* L.), under various conditions of radiation and temperature To cite this version : HAL Id : hal-00886087 Effect of nitrogen nutrition on growth and nitrate accumul.
- Ferentinos, K. P., Albright, L. D., y Ramani, D. V. (2000). Optimal light integral and carbon dioxide concentration combinations for lettuce in ventilated greenhouses. *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 77(3), 309–315.
- Frantz, J. M., y Bugbee, B. (2005). Acclimation of plant populations to shade: Photosynthesis, respiration, and carbon use efficiency. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 130(6), 918–927.
- Gaudreau, L., Charbonneau, J., Gosselin, A., y Vezina, L. P. (1995). Effects of photoperiod and photosynthetic photon flux on nitrate content and nitrate reductase activity in greenhouse-grown lettuce. *Journal of Plant Nutrition*, 18(3), 437–453.
- Gunes, A., Post, W. N. K., Kirkby, E. A., y Aktas, M. (1994). Influence of partial replacement of nitrate by amino acid nitrogen or urea in the nutrient medium on nitrate accumulation in nft grown winter lettuce. *Journal of Plant Nutrition*, 17(11), 1929–1938.
- Kiniry, J. R. (1994). Radiation-use efficiency and grain yield of maize competing with johnsongrass. *Agronomy Journal*, 86(3), 554–557.
- Kim, M. J., Moon, Y., Tou, J. C., Mou, B., y Waterland, N. L. (2016). Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.). *Journal of Food Composition and Analysis*, 49, 19–34.
- Lillo, C. (1994). Light regulation of nitrate reductase in green leaves of higher plants. *Physiologia Plantarum*, 90(3), 616–620.
- Linsley-Noakes, G., Wilken, L., y De Villiers, S. (2006). High density, vertical hydroponics growing system for strawberries. *Acta Horticulturae*, 708, 365–370.
- Liu, W., Chen, D. K., y Liu, Z. X. (2005). High efficiency column culture system in China. *Acta Horticulturae*, 691, 495–500.
- Mccall, B. D., y Willumsen, J. (2016). Effects of nitrogen availability and supplementary light on the nitrate content of soil-grown lettuce. 0316(May).
- REGLAMENTO (UE) N. 1258/2011 DE LA COMISIÓN de 2 de diciembre de 2011 que modifica el Reglamento (CE) n. 1881/2006 por lo que respecta al contenido máximo de nitratos en los productos alimenticios.
- Ouzounis, T., Parjikolaei, B. R., Fretté, X., Rosenqvist, E., y Ottosen, C. O. (2015). Predawn and high intensity application of supplemental blue light decreases the quantum yield of PSII and enhances the amount of phenolic acids, flavonoids, and pigments in *Lactuca sativa*. *Frontiers in Plant Science*, 6(FEB).
- Petropoulos, S. A., Chatzieustratiou, E., Constantopoulou, E., y Kapotis, G. (2016). Yield and quality of lettuce and rocket grown in floating culture system. *Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca*, 44(2), 603–612.
- Pettersen, R. I., Torre, S., y Gislerød, H. R. (2010). Effects of intracanopy lighting on photosynthetic characteristics in cucumber. *Scientia Horticulturae*, 125(2), 77–81.
- Son, K. H., Park, J. H., Kim, D., y Oh, M. M. (2013). Leaf shape index, growth, and phytochemicals in two leaf lettuce cultivars grown under monochromatic light-emitting diodes. *Korean Journal of Horticultural Science and Technology*, 31(1), 664–672.
- Touliatos, D., Dodd, I. C., y Mcainsh, M. (2016). Vertical farming increases lettuce yield per unit area compared to conventional horizontal hydroponics. *Food and Energy Security*, 5(3), 184–191.

Capítulo 6:

Conclusiones

6. Conclusiones

Experimento 1. Optimización del manejo de la solución nutritiva para el cultivo de lechuga Lollo rosso en un sistema flotante

1. La concentración de nutrientes en la SN influye significativamente en el rendimiento, de forma que una disminución en la concentración de los nutrientes supone una reducción en la biomasa de las plantas, y, por tanto, en la producción final del cultivo. Por lo tanto, el mejor manejo en términos de producción fue el del tratamiento “100% H”.
2. Disminución de la concentración de nutrientes en la SN no produce deficiencias nutricionales en las plantas, debido a que la disminución en el crecimiento produce un efecto de concentración de nutrientes minerales en el tejido vegetal, enmascarando así el efecto de la baja concentración de nutrientes en la solución nutritiva en el estado nutricional de las plantas. Por lo tanto, la monitorización y control de la composición mineral de la SN podría ser una buena estrategia para gestionar de forma eficiente la SN de los cultivos hidropónicos de raíz flotante.
3. Una alta concentración de N en la SN puede hacer que la concentración de lechugas supere los valores umbrales de nitratos exigidos por la Unión Europea. En nuestro experimento, una concentración de 14 mM N del tratamiento SN “100% H” hizo que las lechugas superaran en 762,33 mg/kg PF el límite establecido por el Reglamento Europeo. Por lo tanto, la optimización de la SN en este tipo de sistemas debe tener en cuenta tanto el rendimiento agronómico y la calidad de la cosecha como la concentración de nitratos en la parte comestible de las plantas.
4. El tratamiento de “100% H” no solo incrementó la producción, sino que también mejoró la calidad de la cosecha en cuanto al contenido de antocianos, clorofilas (SPAD) y Ca, parámetros que dan valor añadido a la cosecha por su importancia en la dieta humana.

Experimento 2. Comparación de dos sistemas de riego (sistemas flotante y flujo-reflujo) y optimización de su manejo en un cultivo hidropónico de lechuga Batavia

1. En el SF, el intervalo de riego influye significativamente en la concentración de O₂ disuelto en la SN, siendo el mejor manejo el que recircula por más tiempo la solución nutritiva SF10. En sistema FR, el tiempo en el que se dejan las raíces al aire influyó significativamente en los parámetros productivos, siendo el manejo de tiempos FR20 y FR25 los que dieron los mejores resultados. Por lo tanto, el mejor tratamiento para el SF fue SF10, y, para el sistema FR el FR20 y FR25.
2. Ninguno de los manejos ensayados en los dos sistemas de cultivo superó la concentración de nitrato en las lechugas, manteniéndose los valores umbrales exigidos por la Unión Europea. Incluso se disminuyó significativamente el contenido de nitratos en hoja en el sistema FR con respecto al SF.

3. Ninguno de los manejos ensayados en los dos sistemas de cultivo produjo deficiencias o toxicidades nutricionales en las plantas.
4. Los sistemas de riego empleados y su manejo apenas alteraron la calidad organoléptica de las lechugas caracterizadas por el color, textura, y, contenido de clorofilas (uds. SPAD).
5. El manejo con mayores valores de asimilación neta de CO₂ resultó el más productivo desde el punto de vista agronómico, indicando que los manejos en cada uno de los sistemas influyen en los procesos fisiológicos de intercambio gaseoso de las plantas.
6. En cuanto a la calidad nutricional para la dieta humana, en la composición mineral, se observó un ligero déficit nutricional en cuanto al aporte de Mg a la dieta humana en los tratamientos FR25 y SF01, y, una gran concentración en los micronutrientes Fe, Mo y Zn. Por lo que es necesario optimizar la concentración de micronutrientes en la solución nutritiva para bajar la concentración de estos micronutrientes en las plantas.
7. Los manejos de riego del SF indujeron a una mayor peroxidación lipídica en las células vegetales quizá debido a los bajos niveles de oxígeno de la SN. La capacidad antioxidante no se vio afectada por los diferentes manejos de FR, mientras que en SF se observó una clara tendencia al aumento de la capacidad al aumentar la recirculación de la SN en la mesa quizá debido al efecto de la temperatura en la SN.

Experimento 3. Optimización de la densidad de plantación para el cultivo hidropónico vertical de ciclo cerrado de lechuga Butterhead

1. Las estructuras de cultivo vertical utilizadas en este experimento crearon un gradiente de radiación de manera que aumentó la radiación tanto al disminuir la densidad de plantación como al aumentar la altura de las baldas.
2. El gradiente de radiación de las estructuras verticales afecta al rendimiento agronómico del cultivo al afectar al peso fresco de las plantas. El mejor sistema productivo, peso fresco por m², fue el D17 ya que tuvo la más alta radiación acumulada. Por lo tanto, las plantas situadas en estructuras más densas o en posiciones con menos luz tienen un rendimiento agronómico bajo.
3. Por lo tanto, el sistema D17 es la mejor disposición vertical ya que garantiza un buen equilibrio entre el rendimiento y la calidad, y su puesta en marcha y manejo sería menos costosa económicamente que D23 y D32.
4. Desde el punto de vista nutricional, todos los tratamientos empleados estuvieron dentro del rango de normalidad para lechuga excepto en los casos del Zn (40% más de lo normal) y Mo (350% más de lo normal).
5. Ninguno de los manejos ensayados en los tres sistemas de cultivo superó la concentración de nitrato en las lechugas, manteniéndose los valores umbrales exigidos por la Unión Europea. La disminución de densidad en D17 incluso disminuyó significativamente el contenido de nitratos.

6. Se cumplió que, a mayor densidad de plantación y menor altura de cultivo, mayor fue la acumulación de nitratos en hoja.
7. Los sistemas de cultivo vertical constituyen una alternativa viable a los sistemas hidropónicos horizontales al optimizar la eficiencia del área cultivable, produciendo así más cosecha por unidad de superficie. Se podría aumentar aún más el rendimiento incorporando un apoyo de iluminación artificial para mitigar el déficit que produce el efecto de sombreo en altas densidades.

