

“INTERACCIÓN DE SULFATO, CALCIO Y
MAGNESIO EN EL AGUA BAJO DOS TIPOS DE
RIEGO EN LECHUGA (*Lactuca sativa* L.)”

TESIS

POR: ALEJANDRO CEPEDA GUZMÁN

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR
EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO; DICIEMBRE 2013

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

“ANTONIO NARRO”

SUBDIRECCIÓN DE POSTGRADO

“INTERACCIÓN DE SULFATO, CALCIO Y MAGNESIO EN EL AGUA BAJO DOS
TIPOS DE RIEGO EN LECHUGA (*Lactuca sativa* L.)”

TESIS

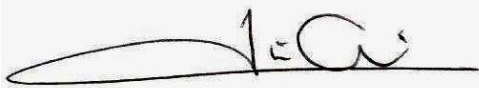
Presentada por:

Alejandro Cepeda Guzmán

Que Somete a Consideración del H. Jurado Examinador Como Requisito Parcial Para
Optar el Grado de:

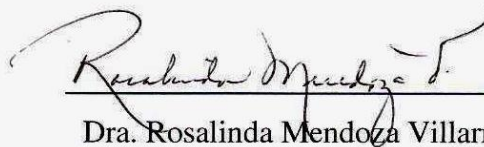
Maestro en Ciencias en Horticultura

Aprobada por:




Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar

Asesor principal

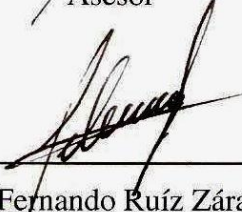


Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal

Asesor


Dr. Alberto Sandoval Rangel

Asesor


Dr. Fernando Ruíz Zárate

Subdirector de Postgrado

AGRADECIMIENTOS

A mis familiares que me impulsaron y apoyaron a que terminara esta profesión de vida, gracias por sus acciones y palabras.

A Don Antonio Narro y Doña Trinidad Narro, por haber donado su hacienda y fortuna para la constitución de una escuela de agricultura, ya que sin su legado, me hubiera sido imposible realizar este postgrado.

A mi Alma Terra Mater, la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, por haberme brindado todos sus servicios, para hacer de mí, un hombre de provecho para mi familia y la nación, gracias por forjarme como un maestro en ciencias.

Al Dr. Luis Alonso Valdez Aguilar, por asesorarme en todo momento y brindarme su confianza y amistad, gracias por guiarme en el camino de la ciencia, y por exigirme cada día más, ya que a usted le debo parte de mi formación.

A la Dra. Rosalinda Mendoza Villarreal, por sus asesorías, orientaciones y críticas para que mi desempeño fuera mejor, por haberme brindado su amistad, confianza y conocimientos en las aulas de clase.

Al Dr. Alberto Sandoval Rangel, por brindarme su apoyo, críticas, confianza, consejos y conocimientos transmitidos en todo momento, exigiéndome cada día más para que mi formación fuera de primera.

A la Dra. Ana María Castillo González, por brindarme su apoyo incondicional en la elaboración de los análisis minerales.

A la Dra. Norma Ruiz Torres, por brindarme su apoyo en la toma de datos de fotosíntesis.

Al Dr. Mario Ernesto Vázquez Badillo, por brindarme su amistad y confianza, por los consejos y conocimientos transmitidos, gracias por ser un amigo en quien confiar.

Al Dr. Efraín Castro Narro, por brindarme su apoyo incondicional durante mi estancia en el postgrado, por la amistad y confianza gracias.

A mis maestros, que fueron mis pilares, gracias por brindarme su amistad, y transmitir todos sus conocimientos para forjar en las aulas maestros en ciencias.

A mis compañeros del postgrado José, Laura, Daily, y principalmente a Victoria, que fueron de gran apoyo, con quienes forme una gran amistad a lo largo de mi estancia, a todos ellos muchas gracias.

A mis amigos los ingenieros Joaquín Junior Sánchez Rama, Belisario Velázquez Pérez, Santiago López López y Omar Ortiz Cervantes, por su apoyo incondicional en este trabajo de investigación, a ellos les debo el que yo haya concluido la investigación, quienes me apoyaron desde el inicio hasta el final, sin importar el día y la hora que fuera, ellos estaban siempre ahí, sinceramente muchas gracias.

DEDICATORIAS

A Dios y la Santísima Madre la Virgen de Guadalupe, por todas las bendiciones que me han concedido, por estar siempre a mi lado y no dejarme caer en los momentos más difíciles de mi vida.

A mis padres el Sr. Jesús Alfonso Cepeda Villegas y Sra. Magdalena Guzmán Martínez, por su esfuerzo, apoyo, confianza y amor incondicional a lo largo de toda mi vida, a quienes les agradezco que siempre están procurando mi bienestar sin esperar nada a cambio.

A mis hermanos Alfonso, Magdalena, Guadalupe, Lucía y mi sobrino Alfonso, apoyándome en todo lo que necesitaba, por su apoyo en los momentos más difíciles, y por su ayuda incondicional para seguir adelante.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS.....	i
DEDICATORIAS.....	iii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	9
Objetivo específicos.....	9
Hipótesis.....	9
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	10
2.1 Origen del cultivo de la lechuga.....	10
2.2 Salinidad.....	10
2.3 Salinidad en el agua.....	12
2.4 Efectos de la salinidad en las plantas.....	14
2.5 El calcio en las plantas.....	17
2.6 El magnesio en las plantas.....	27
2.7 Riego superficial y salinidad.....	30
2.8 Subirrigación.....	31
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	38

3.1 Localización geográfica del trabajo de investigación.....	38
3.2 Material genético.....	38
3.3 Metodología.....	39
3.3.1 Preparación del sustrato.....	39
3.3.2 Trasplante.....	39
3.4 Tratamientos.....	39
3.5 Manejo agronómico del cultivo de lechuga.....	40
3.5.1 Nutrición y riegos.....	40
3.5.2 Cosecha.....	41
3.6 Variables evaluadas.....	41
3.7 Diseño experimental.....	43
IV. RESULTADOS.....	44
4.1 Diámetro de la planta.....	44
4.2 Peso fresco.....	45
4.3 Turgencia.....	47
4.4 Fotosíntesis.....	48
4.5 Conductancia de la hoja.....	49

4.6 Tasa de transpiración.....	50
4.7 pH del sustrato: estrato inferior.....	52
4.8 pH del sustrato: estrato medio.....	53
4.9 pH del sustrato: estrato superior.....	54
4.10 CE del sustrato: estrato inferior.....	55
4.11 CE del sustrato: estrato medio.....	56
4.12 CE del sustrato: estrato superior.....	57
4.13 Análisis mineral para nitrógeno y fósforo.....	58
4.14 Análisis mineral para potasio.....	59
4.15 Análisis mineral para calcio.....	60
4.16 Análisis mineral para magnesio.....	62
V. DISCUSIÓN.....	63
VI. CONCLUSIONES.....	70
VII. RESUMEN.....	71
VIII. ABSTRACT.....	73
IX. LITERATURA CITADA.....	75

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Concentración de Mg en diferentes cultivos.....	30
Cuadro 2. Tratamientos.....	40
Cuadro 3. Concentración constante de la solución nutritiva de Hoagland durante los tratamientos.....	40
Cuadro 4. Parámetros evaluados durante el ciclo del cultivo de lechuga en condiciones de agricultura protegida y salinidad.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de distribución de Ca en pectinas.....	18
Figura 2. Representación esquemática de la pared celular primaria de las plantas dicotiledóneas.....	20
Figura 3. Distribución de Ca y distribución de la masa seca en <i>Capsicum annuum</i>	24
Figura 4. Estructura del sistema de subirrigación.....	32
Figura 4.1. Diámetro de plantas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.....	45
Figura 4.2. Peso fresco de plantas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.....	46
Figura 4.3. Turgencia de plantas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.....	47
Figura 4.4. Fotosíntesis de la hoja de plantas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.....	48

Figura 4.5. Conductancia de la hoja de plantas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.....50

Figura 4.6. Tasa de transpiración de la hoja de plantas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.....51

Figura 4.7. pH del estrato inferior del sustrato en tres muestreos bajo dos tipos de riego y soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm).....52

Figura 4.8. pH del estrato medio del sustrato en tres muestreos bajo dos tipos de riego y soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm).....53

Figura 4.9. pH del estrato superior del sustrato en tres muestreos bajo dos tipos de riego y soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm).....54

Figura 4.10. Conductividad eléctrica (CE) del estrato inferior del sustrato en tres muestreos bajo dos tipos de riego y soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm).....55

Figura 4.11. Conductividad eléctrica (CE) del estrato medio del sustrato en tres muestreos bajo dos tipos de riego y soluciones

nutritivas con diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm).....56

Figura 4.12. Conductividad eléctrica (CE) del estrato superior del sustrato en tres muestreos bajo dos tipos de riego y soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm).....58

Figura 4.13. Concentración de nitrógeno(N) y fósforo (P) en hojas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.....58

Figura 4.14. Concentración de potasio (K) en hojas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.....59

Figura 4.15. Concentración de calcio (Ca) en hojas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.....61

Figura 4.16. Concentración de magnesio (Mg) en hojas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.....62

Figura 5. Estructura del sistema de subirrigación.....33

Figura 6. Estructura del sistema de subirrigación.....33

I. INTRODUCCIÓN

La salinización ha sido identificada como un factor muy importante en la degradación de los suelos agrícolas (Barkla *et al.*, 2007). Con el progreso del riego, ha surgido el problema de la salinidad. La salinidad afecta a un siete por ciento de la superficie terrestre del mundo, ascendiendo a 930 millones de hectáreas (Szablocs 1994; FAO, 2008; Munns y Tester, 2008). Se estima que se pierden al año cerca de 1.5 millones de hectáreas de suelos irrigados, lo cual resulta en una reducción de aproximadamente 11 mil millones de dólares en la productividad agrícola (Barkla *et al.*, 2007.). De los 1500 millones de hectáreas de tierras cultivadas por la agricultura de secano, 32 millones de hectáreas (dos por ciento) se ven afectados por la salinidad secundaria en diversos grados (FAO, 2008).

Los lugares donde se observa con más frecuencia son las cuencas cerradas que, a través de miles de años, han acumulado paulatinamente sales en el perfil del suelo (Fernández, 1990; Serrato *et al.*, 2000). Treinta por ciento de los 5.5 millones de hectáreas que son irrigadas en México están afectadas por la salinidad (Barkla *et al.*, 2007), y de ésta, aproximadamente el 64 por ciento se localiza en la parte norte del país, donde las aguas subterráneas salinas son la principal fuente de agua para riego (Umali, 1993).

El problema se produce por acumulación de sales solubles en la zona radical de los cultivos, hasta niveles o concentraciones que causan pérdidas de rendimiento (Báez, 1999). La salinidad es causada por una excesiva acumulación de iones, principalmente sodio (Na), calcio (Ca), magnesio (Mg), cloro (Cl), sulfato (SO_4^{2-}), carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-) (Cartmill *et al.*, 2007; Grattan y Grieve, 1999), cuando la conductividad eléctrica (CE) es de 4 dS /m^{-1} ó más (USDA-ARS, 2008), lo que equivale a aproximadamente 40 mM de NaCl, generando una presión osmótica de aproximadamente -0.2 MPa (Munns y Tester, 2008). Lo anterior provoca un incremento en el potencial osmótico y en la presencia de algunos iones que alcanzan concentraciones que llegan a ser tóxicas para algunos cultivos (INIFAP, 2001).

La capacidad para conducir el agua disminuye en plantas expuestas a condiciones de salinidad, puesto que la alta concentración salina crea un hábitat de condiciones de sequía fisiológica. Dicha reducción en la capacidad conductora puede ser consecuencia en la disminución del tamaño de los vasos del xilema (Huang y Redmann, 1995; Degano, 1999).

El efecto general de la salinidad es reducir la tasa de crecimiento obteniendo hojas más pequeñas y menor altura. El efecto inicial y primario de la salinidad, especialmente de bajas a moderadas concentraciones se debe a sus efectos osmóticos (Munns y Termaat, 1986; Jacoby, 1994). La salinidad puede

inhibir el crecimiento de la planta y reducir la productividad, principalmente por tres factores, el déficit hídrico, la toxicidad por iones y el desbalance nutricional (Munns, 2002).

La salinidad reduce la capacidad de la planta a absorber agua debido al bajo potencial hídrico, lo que rápidamente da lugar a reducciones en la tasa de crecimiento (Barrett-Lennard, 2003), junto con una serie de cambios metabólicos idénticos a los causados por el estrés hídrico. Las cantidades excesivas de sal que entran a la planta, elevarán los niveles tóxicos en las hojas más viejas, causando envejecimiento prematuro y reduciendo el área foliar fotosintética de la planta a un nivel que no pueda sostener el crecimiento (Munns, 2002).

Los iones de Ca y los grupos carboxilo de fosfolípidos y proteínas superficies (Legge *et al.*, 1982), ayudan a mantener la estructura de la membrana. Además, se produce un cierto efecto en el medio de la membrana, posiblemente a través de la interacción de Ca y proteínas que son una parte integral de las membranas (Legge *et al.*, 1982; Duzgunes y Papahadjopoulos, 1983). La presencia del Ca, da un poco de fuerza de carga a la pared celular (Virk y Cleland, 1988). Se sugiere que cuando una pared celular primaria se está expandiendo, la acumulación localizada de iones H^+ pueden desplazar el Ca de los dominios homogalacturonanos (HG), lo que reduce el grado en que la

pectina tiene las hebras juntas a xiloglucano (XG) (Blamey, 2003). En una célula de la punta de la raíz, donde las microfibrillas de celulosa están orientadas transversalmente, el deslizamiento de las cadenas XG permite que las microfibrillas de celulosa se mueven más separados el uno del otro, dando la expansión de células en una dirección longitudinal (Barker y Pilbeam, 2007).

La formación de oxalato cálcico en las vacuolas ayuda a mantener un nivel bajo de Ca libre en el citosol y en el cloroplasto, lo que permite la regulación de la presión osmótica. El Ca tiende a reducir la permeabilidad de las raíces jóvenes, lo que provoca la expansión de estas y también la de sus pelos radiculares, lo que potencia una mayor y más eficaz exploración del suelo (Monge *et al.*, 1994).

El rápido influjo de Ca a través de canales de cationes en la membrana plasmática, tonoplasto y/o retículo endoplasmático genera perturbaciones en las concentraciones del Ca citosólico que inician la respuesta celular a una amplia gama de señales de desarrollo (White, 2000; Sanders *et al.*, 2002). Las proteínas que conforman el cambio de la actividad catalítica tras la unión del Ca, como la calmodulina (CaM), calcineurina B como las proteínas CBL y proteínas quinasas dependientes del Ca (CDPKs), permiten la percepción celular y transducción de señales de las concentraciones del Ca en el citosol (White y Broadley, 2003).

El Ca puede inhibir enzimas citoplasmáticas directamente, o por la competencia con Mg. El Ca también puede reaccionar con la calmodulina proteína de unión a Ca (CaM). Hasta cuatro iones de Ca puede unirse reversiblemente a cada molécula de calmodulina, y esta unión expone dos áreas hidrofóbicas de la proteína que permite que se una a las regiones hidrófobas en un gran número de enzimas clave y para activarlos (Snedden y Fromm, 2001). El aumento de las concentraciones de ácido abscísico (ABA) de los brotes después de la imposición de estrés por déficit de agua, conduce a un aumento de la concentración citoplasmática de Ca en células guarda, un aumento que precede al cierre de los estomas (Rudd y Tong, 2001).

El Mg tiene importantes funciones fisiológicas y moleculares en plantas, tales como ser un componente de la molécula de clorofila, un cofactor para muchos procesos enzimáticos asociados con la fosforilación, desfosforilación, y la hidrólisis de diversos compuestos, y como un estabilizador estructural para varios nucleótidos. Los estudios indican que del 15 al 30 por ciento del Mg total en las plantas está asociado con la molécula de clorofila (Marschner, 1995).

La cantidad de Mg acumulada será diferente para distintos órganos de la planta, con una tendencia hacia una mayor asignación de Mg en órganos de transpiración tales como hojas y flores, en lugar de las raíces (Drossopoulos *et al.*, 1996 (a); Drossopoulos *et al.*, 1996 (b); Satti *et al.*, 1996), sin embargo, esta

translocación a diferentes partes de la planta puede verse afectada por el estado de otros elementos (Nenova y Stoyanov, 1999; Sonneveld y Voogt, 1991).

El uso del riego localizado, asociado a la alta carga de sales solubles que contienen las aguas de riego y el suelo, van originando gradualmente una acumulación de sales, producto del movimiento característico del frente húmedo del bulbo de mojado (López *et al.*, 1992). El diseño del sistema de subirrigación parte del principio de que el estrato actúa como una barrera al movimiento vertical del agua, lo cual produce el movimiento lateral de la misma (Renny *et al.*, 2003; Schmal *et al.*, 2011); el ascenso de ésta hasta la zona radical por efecto de la capilaridad, reduce la cantidad de agua necesaria para la producción de plantas de alta calidad, pudiendo utilizar las aguas residuales, y reduciendo la lixiviación de nutrientes en comparación con los sistemas tradicionales de riego por aspersión.

Investigaciones recientes han demostrado beneficios adicionales de la subirrigación, tales como una mayor uniformidad de los cultivos y mejorar el rendimiento del trasplante al campo (Schmal *et al.*, 2011). En los sistemas de subirrigación, la salinidad del cultivo debe tener una importancia relevante, y existen factores que se deben de tomar en cuenta, como lo son: el tiempo de inundación, con exceso de agua en el sustrato existe una deficiencia de

oxígeno, acumulación de nitritos, toxicidad y por tanto daño a las raíces; sustratos con drenaje insuficiente y poca aireación; acumulación de sales; utilización de soluciones nutritivas inapropiadas con exceso de nitrógeno amoniacal (Casas, 1996).

La lechuga es la planta más importante del grupo de las hortalizas de hoja. En México se puede cultivar durante todo el año bajo riego; reportándose una superficie sembrada de 4,000 has, con rendimientos que pueden variar desde siete a 23 ton ha⁻¹. Los principales estados productores son Guanajuato, Sonora, Puebla, Baja California, Jalisco y San Luis Potosí (INIFAP, 2001).

Considerando que en las zonas áridas del norte de México se presentan con frecuencia altos niveles de Ca, Mg y SO₄²⁻ en el agua de riego, y que éstos impactan directamente la CE, se planeó determinar la respuesta de lechuga a altos niveles de Ca, Mg y SO₄²⁻ en el agua de riego bajo dos tipos de irrigación, y en base a la composición del agua de riego, definir la concentración de tales nutrimentos requeridos para suplementar las necesidades de las plantas en ambos tipos de riego, realizando un análisis nutrimental para determinar la concentración de elementos dentro del tejido y correlacionarlo con la salinidad del agua y el tipo de riego.

El desarrollo y producción del cultivo de lechuga bajo condiciones de invernadero se encuentra influenciado por la concentración de Ca, Mg y SO_4^{2-} que componen el agua, además de ser influenciados por el tipo de irrigación.

Objetivo general

Determinar la respuesta de lechuga a altos niveles de calcio, magnesio y sulfatos en el agua de riego bajo dos tipos de irrigación.

Objetivos específicos

- En base a la composición del agua de riego, definir la concentración de tales nutrimentos requeridos para suplementar las necesidades de las plantas en ambos tipos de riego.
- Realizar un análisis nutrimental para determinar la concentración de elementos dentro del tejido y correlacionarlo con la salinidad del agua y el tipo de riego.

Hipótesis

El desarrollo y producción del cultivo de lechuga bajo condiciones de invernadero se encuentra influenciado por la concentración de sulfatos, calcio y magnesio que componen el agua, además de ser influenciados por el tipo de irrigación.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Origen del Cultivo de la Lechuga

La lechuga es la planta más importante del grupo de las hortalizas de hoja, se cultiva en casi todos los países del mundo. Es muy apreciada por su alto contenido de vitaminas, indispensable en la dieta moderna. En México se puede cultivar durante todo el año bajo riego; se reporta una superficie sembrada de 4,000 has, con rendimientos que pueden variar desde siete a 23 ton ha⁻¹. Los principales estados productores son Guanajuato, Sonora, Puebla, Baja California, Jalisco y San Luis Potosí (INIFAP, 2001).

2.2 Salinidad

La salinización ha sido identificada como un factor muy importante en la degradación de los suelos agrícolas (Barkla *et al.*, 2007). Con el progreso del riego, ha surgido el problema de la salinidad. Una gran cantidad de sal dentro de los perfiles de suelo profundamente erosionados y la eliminación de la vegetación nativa se han traducido en cambios hidrológicos y de extensa salinización (George *et al.*, 1997).

La salinidad afecta a un siete por ciento de la superficie terrestre del mundo, ascendiendo a 930 millones de hectáreas (Szablocs 1994; FAO, 2008;

Munns y Tester, 2008). Un estudio global de uso de suelo de más de 45 años encontró que el seis por ciento se había convertido en suelo salino (Ghassemi *et al.*, 1995). En Australia, dos millones de hectáreas se han convertido en suelos salinos desde hace un siglo, y otros 15 millones de hectáreas están en riesgo de convertirse en los próximos 50 años (National Land and Water Resources Audit, 2011). Esto representa un tercio de la superficie agrícola de Australia (Szablocs, 1994).

De acuerdo a la Organización Mundial de la Salud (OMS), de los 230 millones de hectáreas que se encuentran bajo irrigación, 45 millones están afectados por la salinidad (FAO, 2008; Ghassemi *et al.*, 1995). Se estima que se pierden al año cerca de 1.5 millones de hectáreas de suelos irrigados, lo cual resulta en una reducción de aproximadamente 11 mil millones de dólares en la productividad agrícola (Barkla *et al.*, 2007.). Por lo tanto, debido a la reducción en las tierras de regadío, es importante poder regar con las aguas que actualmente no se utilizan debido a su alta salinidad (Cuartero y Fernández, 1999).

De los 1500 millones de hectáreas de tierras cultivadas por la agricultura de secano, 32 millones de hectáreas (dos por ciento) se ven afectados por la salinidad secundaria en diversos grados (FAO, 2008).

La salinidad de los suelos es un problema mundial, nacional en México y regional en el centro y norte del país. El problema se agudiza en las zonas áridas y semiáridas con riego (Szablocs, 1994, Fernández, 1990; Serrato *et al.*,

2000), donde los suelos presentan drenaje deficiente y alta evaporación (Szablocs, 1994). Los lugares donde se observa con más frecuencia son las cuencas cerradas que, a través de miles de años, han acumulado paulatinamente sales en el perfil del suelo (Fernández, 1990; Serrato *et al.*, 2000). Treinta por ciento de los 5.5 millones de hectáreas que son irrigadas en México están afectadas por la salinidad (Barkla *et al.*, 2007), y de ésta, aproximadamente el 64 por ciento se localiza en la parte norte del país, donde las aguas subterráneas salinas son la principal fuente de agua para riego (Umali, 1993).

La disponibilidad y calidad del agua son temas de gran preocupación en todo el mundo. El agua de buena calidad es limitada, especialmente en regiones áridas y semiáridas del mundo (Grieve *et al.*, 2005).

El valle de San Luis Potosí, pertenece a la región semiárida del país, la importancia del agua subterránea se hace evidente debido a que todas las actividades económicas incluyendo la agropecuaria, consumen casi un 95 por ciento del total requerido del acuífero profundo y somero (Sarabia *et al.*, 2009).

2.3 Salinidad en el Agua

El problema se produce por acumulación de sales solubles en la zona radical de los cultivos, hasta niveles o concentraciones que causan pérdidas de rendimiento (Báez, 1999). La salinidad es causada por una excesiva acumulación de iones, principalmente Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} y HCO_3^- .

(Cartmill *et al.*, 2007; Grattan y Grieve, 1999), cuando la CE es de 4 dS /m⁻¹ ó más (USDA-ARS, 2008), lo que equivale a aproximadamente 40 mM de NaCl, generando una presión osmótica de aproximadamente -0.2 MPa (Munns y Tester, 2008). Lo anterior provoca un incremento en el potencial osmótico y en la presencia de algunos iones que alcanzan concentraciones que llegan a ser tóxicas para algunos cultivos (INIFAP, 2001).

La capacidad para conducir agua disminuye en plantas expuestas a condiciones de salinidad, puesto que la alta concentración salina crea un hábitat de condiciones de sequía fisiológica. Dicha reducción en la capacidad conductora puede ser consecuencia en la disminución del tamaño de los vasos, efecto observado en plantas de algodón, tomate y cebada silvestre (Huang y Redmann, 1995; Degano, 1999).

Según Richards (1980) el método hidrotécnico que consiste en manejar la cantidad y calidad química de las aguas disponibles para mantener las sales solubles y las intercambiables a un nivel que no afecten directa o indirectamente el desarrollo de los cultivos, es el procedimiento más efectivo para eliminar el exceso de sales en el suelo (Serrato *et al.*, 2000).

Díaz *et al.* (1994) mencionan en su artículo que la precipitación de fósforo (P) inorgánico aumenta a concentraciones de Ca por encima de 100 mg L⁻¹ y a pH > 9.0. Mencionan que en su investigación la solubilidad del P inorgánico en el área superficial del agua disminuyó por encima de pH 8.5 a 9.0, precipitando más del 60 por ciento del P soluble a todos los niveles de Ca (20 y

50 mg de Ca L⁻¹) sin verse afectada un pH < 9. La disminución de la solubilidad de P incrementó los niveles de pH y Ca lo que sugiere que la formación de minerales de fosfato de Ca se forma en la corriente del agua del canal. Mencionan también que el fosfato de Ca formado en el lago Otter Creek en Vermont, USA, y las aguas del lago seco se disolvieron rápidamente cuando el pH disminuyó.

2.4 Efectos de la Salinidad en las Plantas

El efecto general de la salinidad es reducir la tasa de crecimiento obteniendo hojas más pequeñas, menor altura, y a veces menos hojas. El efecto inicial y primario de la salinidad, especialmente de bajas a moderadas concentraciones se debe a sus efectos osmóticos (Munns y Termaat, 1986; Jacoby, 1994). La salinidad puede inhibir el crecimiento de la planta y reducir la productividad, principalmente por tres factores, el déficit hídrico, la toxicidad por iones y el desbalance nutricional (Munns, 2002).

La reducción de la altura de las plantas y aún la producción de achaparramiento es otro claro efecto de la incidencia de la salinidad en el crecimiento de las halófitas (Degano, 1999).

La alta salinidad del suelo puede causar desequilibrio de nutrientes, como resultado de la acumulación de elementos tóxicos para las plantas y reducción de la infiltración de agua si el nivel de Na es alto. (Kotuby *et al.*, 2000). Asimismo causa un desbalance iónico tanto externo como interno, donde

el Na compite con el K, Na desplaza el Ca, Cl^- compite con NO_3^- (Marschner, 1995).

La salinidad reduce la capacidad de la planta a absorber agua debido al bajo potencial hídrico, lo que rápidamente da lugar a reducciones en la tasa de crecimiento (Barrett-Lennard, 2003), junto con una serie de cambios metabólicos idénticos a los causados por el estrés hídrico. Las cantidades excesivas de sal que entran a la planta, elevarán los niveles tóxicos en las hojas más viejas, causando envejecimiento prematuro y reduciendo el área foliar fotosintética de la planta a un nivel que no pueda sostener el crecimiento. Las plantas tolerantes a la sal difieren de las sensibles por tener una baja tasa de transporte de Na y Cl^- a las hojas, y la habilidad de compartimentalizar estas iones en las vacuolas para evitar su acumulación en el citoplasma o paredes de la célula (Munns, 2002).

A medida que la concentración en la pared comienza a subir, la célula se encoge, la concentración de iones en el interior se elevará, y algunos se añaden a los que aún siguen llegando en el flujo de transpiración de las raíces (Munns y Passioura, 1984).

Otra respuesta fisiológica de las plantas a la salinidad se da disminuyendo la conductancia estomática; de esta forma se reduce la transpiración evitando la sequía fisiológica para mantener la turgencia de las células. La reducción de la conductancia estomática implica el cierre de los estomas y se relaciona, entre otros factores (luz, humedad, CO_2 , temperatura y

corrientes de aire), con la disminución del potencial de agua foliar, incluso por encima de la luz intensa. El cierre de los estomas reduce el ingreso de CO₂ inhibiendo la fotosíntesis, dando como resultado la reducción en la síntesis de fotosintatos (Salisbury y Ross, 2000). En general, la consecuencia es la disminución en la producción de biomasa, como raíces, hojas, tallos y semillas, relacionados con el área foliar y la longitud de plantas (Porta *et al.*, 1994).

Las lesiones causadas por salinidad se deben a sales al acumularse en las hojas cuando la transpiración es excesiva, superando la capacidad de las células a compartimentalizar estos iones en la vacuola. Los iones se acumulan rápidamente en el citoplasma o la pared celular e inhiben la actividad enzimática, deshidratando la célula (Flowers y Yeo, 1986; Munns y Passioura, 1984).

El crecimiento de las plantas responde a la salinidad de dos fases: Una fase rápida, la fase osmótica, que inhibe el crecimiento de las hojas jóvenes, y una fase más lenta, la fase iónica, que acelera la senescencia de las hojas maduras (Munns y Tester, 2008).

Las plantas afectadas por la salinidad muestran hojas verde oscuro, las cuales, en algunos casos, son más gruesas y suculentas de lo normal (Kotuby *et al.*, 2000). Las plantas son más sensibles a los altos niveles de salinidad en las etapas de plántula, inmediatamente después del trasplante, y cuando estén sujetas a otros estreses (por ejemplo, enfermedades, insectos, nutrientes).

Las sales en el exterior de las raíces tienen un efecto inmediato sobre el crecimiento celular y el metabolismo, y las concentraciones tóxicas de sales necesitan tiempo para acumularse dentro de las plantas, antes de que afecten la función de la planta (Munns y Tester, 2008).

En tomate, los rendimientos se reducen cuando las plantas crecen con una solución nutritiva de 2.5 dS m^{-1} o superior, y por encima de 3.0 dS m^{-1} , un aumento de 1 dS m^{-1} resulta en una reducción del rendimiento de alrededor de nueve a 10 por ciento (Cuartero y Fernández, 1999).

2.5 El Calcio en las Plantas

Los iones de Ca y los grupos carboxilato de fosfolípidos y proteínas superficies (Legge *et al.*, 1982), ayudan a mantener la estructura de la membrana. Además, se produce un cierto efecto en el medio de la membrana, posiblemente a través de la interacción de Ca y proteínas que son una parte integral de las membranas (Legge *et al.*, 1982; Duzgunes y Papahadjopoulos, 1983). Posiblemente, el Ca puede ligarse a grupos fosfatidil-serina adyacentes, y la unión de los fosfolípidos juntos en ciertas áreas se hacen más rígidas que en las zonas circundantes (Grant, 1983).

En la pared celular primaria, las microfibrillas de celulosa están unidas entre sí por entrecruzamiento de glicanos, por lo general polímeros de xiloglucano (XG), sino también glucoarabinoxylanos en Poaceae (gramíneas) y otras monocotiledóneas (Willats *et al.*, 2001). Estas microfibrillas entrelazados

están incrustadas en una matriz, en la que la pectina es la clase más abundante de la macromolécula (Barker y Pilbeam, 2007).

La pectina se compone de dominios homogalacturonanos (HG) y ramnogalacturonanos (RG). Los dominios HG son un polímero lineal de (1→4)- α' vinculado al ácido D-galacturónico, y se depositan en la pared celular con 70 a 80 por ciento de los residuos de ácido galacturónico metil-esterificados (Willats *et al.*, 2001). Los grupos-éster de metilo se eliminan mediante pectina metilesterasas, permitiendo que los iones de Ca se unan a las cargas negativas y por lo tanto sean expuestos para formar puentes entre polímeros que tienen cadenas principales en conjunto (Willats *et al.*, 2001; Barker y Pilbeam, 2007) (Figura 1).

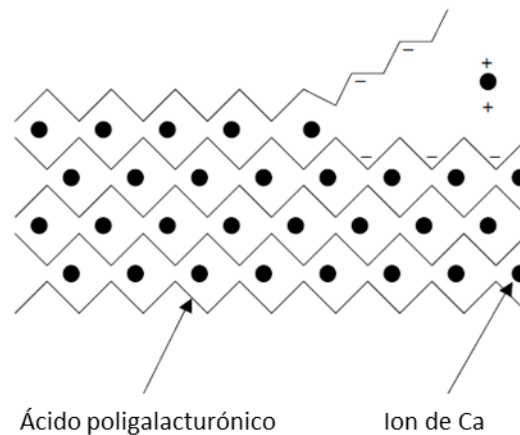


Figura 1. Modelo de distribución de Ca en pectinas (Barker y Pilbeam, 2007).

La pectina es un gel altamente hidratado que contiene poros; cuanto menor sea el tamaño de estos poros, mayor será la concentración de Ca en la matriz y produciendo más entrecruzamiento de las cadenas (Blamey, 2003). Este gel tiene las moléculas XG en posición uno respecto al otro, y estas moléculas a su vez mantienen las microfibrillas de celulosa juntas (Figura 2). La presencia del Ca, por lo tanto, da un poco de fuerza de carga a la pared celular (Virk y Cleland, 1988). Se sugiere que cuando una pared celular primaria se está expandiendo, la acumulación localizada de iones H^+ pueden desplazar el Ca de los dominios HG, lo que reduce el grado en que la pectina tiene las hebras juntas a XG (Blamey, 2003). En una célula de la punta de la raíz, donde las microfibrillas de celulosa están orientadas transversalmente, el deslizamiento de las cadenas XG permite que las microfibrillas de celulosa se mueven más separados el uno del otro, dando la expansión de células en una dirección longitudinal (Barker y Pilbeam, 2007).

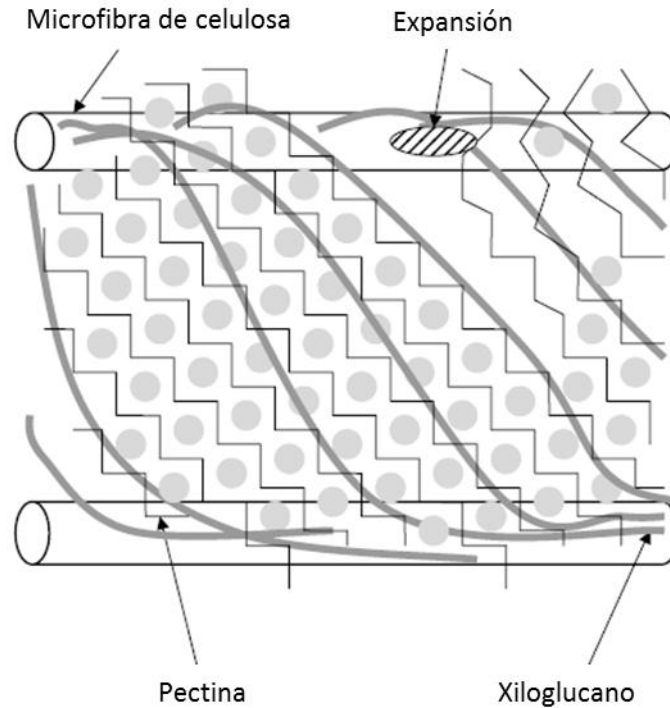


Figura 2. Representación esquemática de la pared celular primaria de las plantas dicotiledóneas. A la derecha de la figura, los iones de Ca han sido desplazados de los dominios de HG por los iones H^+ , de modo que la pectina ya no es un gel adhesivo y se produce el deslizamiento de los vínculos entre las cadenas adyacentes XG y la expansión es capaz de trabajar en ellos. Esto afloja la estructura y permite que las microfibrillas de celulosa sean más separadas por el empuje de la turgencia de la célula (Barker y Pilbeam, 2007).

En la maduración de los frutos, una relajación de las células, posiblemente, podría ocurrir con la pérdida de Ca. Se ha postulado que la disminución en el pH apoplásico en la maduración de frutas de pepita puede causar la liberación de iones de Ca de la pectina, lo que permite su solubilización (Knee, 1982). Sin embargo, en un experimento en tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), La disminución en el pH apoplásico que se produjo, no corresponde con una disminución notable en la concentración de

Ca apoplástico, permaneciendo el ion lo suficientemente alto como para limitar la solubilización de la pectina (Almeida y Huber, 1999).

Dentro de las plantas, el Ca está presente en forma de iones de Ca unidos a grupos carboxilo en las paredes celulares por reacciones de intercambio catiónico. Como aproximadamente un tercio de las macromoléculas en la pared celular primaria son pectina (Willats *et al.*, 2001), se puede observar que una gran proporción se produce como pectato de Ca. La pectina también puede unirse a los aniones, como vanadato, y sirven para desintoxicar estos iones. El catión de Ca también se unirá con los aniones orgánicos formados durante la asimilación de nitrato en las hojas; estos aniones llevan una carga negativa que al ser liberada en forma de nitrato se convierten en amonio (Kirkby y Knight, 1977). Por lo tanto, no habrá formación de malato de Ca y oxalacetato de Ca y, también muy comúnmente, oxalato de Ca en las células (Barker y Pilbeam, 2007).

El oxalato de Ca se puede producir dentro de las células y como depósitos extracelulares. La acumulación de oxalato de Ca en las células del parénquima es común en las plantas en la mayoría de las familias. Hasta el 90 por ciento del Ca total en las plantas individuales se encuentra en esta forma (Kostman *et al.*, 2003; Nakata, 2003). La formación de cristales de oxalato de Ca se produce en células especializadas e idioblastos de cristal; y como el oxalato de Ca en estas células es osmóticamente inactivo su formación sirve para disminuir la concentración de Ca en el apoplasto de las células circundantes sin afectar el equilibrio osmótico del tejido (Kostman *et al.*, 2003).

La formación de oxalato cálcico en las vacuolas ayuda a mantener un nivel bajo de Ca libre en el citosol y en el cloroplasto, lo que permite la regulación de la presión osmótica. El Ca tiende a reducir la permeabilidad de las raíces jóvenes, lo que provoca la expansión de estas y también la de sus pelos radiculares, lo que potencia una mayor y más eficaz exploración del suelo (Monge *et al.*, 1994).

El Ca se mueve hacia las raíces por el flujo de difusión y de masa en el suelo (Hegde, 1988). Una serie de canales iónicos específicos de Ca se producen en las membranas de las células de la raíz, a través del cual se produce la afluencia, pero estos canales parecen estar más involucrados en permitir los flujos rápidos de Ca en el citoplasma y orgánulos, como parte de los mecanismos de señalización (White, 2000). Este Ca se mueve entonces en vacuolas, retículo endoplásmico, u otros orgánulos, con el movimiento que ocurre por medio de transportadores específicos de Ca (Bush, 1995).

El rápido influjo de Ca a través de canales de cationes en la membrana plasmática, tonoplasto y/o retículo endoplasmático genera perturbaciones en las concentraciones del Ca citosólico que inician la respuesta celular a una amplia gama de señales de desarrollo (White, 2000; Sanders *et al.*, 2002). Las proteínas que conforman el cambio de la actividad catalítica tras la unión del Ca, como la calmodulina (CaM), calcineurina B como las proteínas CBL y proteínas quinasas dependientes del Ca (CDPKs), permiten la percepción celular y transducción de señales de las concentraciones del Ca en el citosol. Se especula que las respuestas celulares a estímulos específicos bióticos y

abióticos son codificados por distintas perturbaciones en la concentración del Ca en el citosol y se transducen por sensores particulares del Ca citosólico (White y Broadley, 2003).

Como el Ca no es móvil en el floema, no se puede retranslocar de brotes de tejidos viejos a los tejidos jóvenes, y su transporte por el xilema en órganos que no tienen una alta tasa de transpiración (tales como frutas) es bajo (Kirkby y Pilbeam, 1984). Su flujo en las hojas también disminuye después de la madurez, a pesar de que la tasa de transpiración de la hoja se mantiene constante, y esta respuesta podría estar relacionado con una disminución en la actividad de la nitrato reductasa (Kirkby y Pilbeam, 1984; Bellaloui y Pilbeam, 1990). Cuando una deficiencia general de Ca se produce en las plantas, debido a la baja movilidad de Ca en el floema, son las hojas nuevas las que se ven afectadas, permaneciendo el Ca predominantemente en los tejidos viejos (Figura 3) (Barker y Pilbeam, 2007).

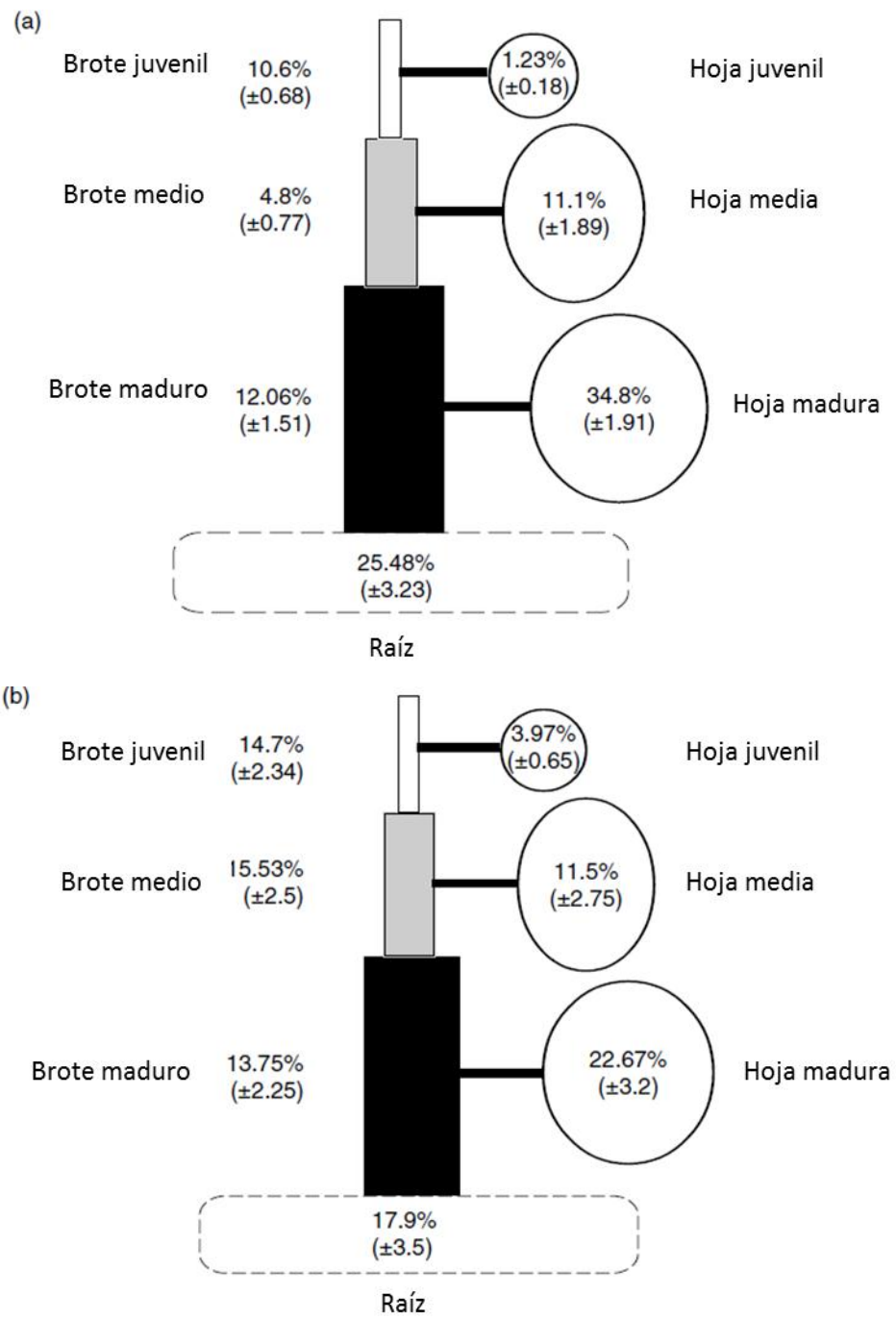


Figura 3. Distribución del Ca (a) y distribución de la masa seca (b) en *Capsicum annum* cv Bendigo de plantas crecidas en solución nutritiva a los 63 días (los valores son medias de valores de nueve plantas ± error estándar) (Barker y Pilbeam, 2007).

A diferencia de potasio (K) y Mg, el Ca no activa muchas enzimas (Rensing y Cornelius, 1980), y su concentración en el citoplasma se mantiene baja. La homeostasis del Ca se consigue por la acción de ATPasas dependientes de Ca unidas a la membrana, que bombean activamente iones de Ca desde el citoplasma y en las vacuolas, el retículo endoplasmático (RE), y la mitocondria (Bush, 1995).

El Ca puede ser liberado del almacenamiento, en particular en la vacuola, dentro del citoplasma. Tal flujo es rápido (Britto y Kronzucker, 2003), ya que se produce por medio de canales de concentración milimolar en la vacuola a concentraciones nanomolares en el citoplasma de las células en reposo (Rudd y Tong, 2001). El Ca puede inhibir enzimas citoplasmáticas directamente, o por la competencia con Mg. El Ca también puede reaccionar con la calmodulina proteína de unión a Ca (CaM). Hasta cuatro iones de Ca puede unirse reversiblemente a cada molécula de calmodulina, y esta unión expone dos áreas hidrofóbicas de la proteína que permite que se una a las regiones hidrófobas en un gran número de enzimas clave y para activarlos (Snedden y Fromm, 2001). El complejo de Ca-calmodulina también puede estimular la actividad de las ATPasas dependientes de Ca (Marmé, 1983).

Otros sensores de concentración de Ca en el citoplasma son, por ejemplo, proteínas quinasas dependientes de Ca (CaM-independiente) (Snedden y Fromm, 2001). Los rápidos incrementos en la concentración de Ca citoplasmático que se producen cuando los canales se abren y dejan el Ca fuera del almacén vacuolar, dan una serie de señales de Ca que forman parte

de las respuestas de la planta a un gama de señales ambientales. Estas respuestas permiten a la planta responder a la sequía, la salinidad, el golpe de frío, el estrés mecánico, el ozono, la luz azul, la radiación ultravioleta, y otros estreses (Rudd y Tong, 2001).

Por otro lado, los niveles de Ca libre en el citoplasma y en los cloroplastos deben ser muy bajos, para evitar la precipitación del fósforo inorgánico y la inactivación o activación incontrolada de ciertas enzimas como la fosfolipasa y la NAD-quinasa (Dieter, 1984).

Una implicación de Ca en las acciones de fitohormonas es que al parecer el crecimiento de las raíces cesa dentro de sólo unas pocas horas al eliminar el Ca de una solución nutritiva (Kirkby y Pilbeam, 1984). A medida que la relación es un proceso de dos vías, no se puede confirmar fácilmente si se requiere Ca por la acción del ácido indolacético (IAA) o si la acción de IAA da lugar a un crecimiento celular, y desarrollo de la pared celular consiguiente. También es posible que IAA influya en el desarrollo de xilema del tejido tratado (Ho y Adams, 1989).

El aumento de las concentraciones de ácido abscísico (ABA) de los brotes después de la imposición de estrés por déficit de agua, conduce a un aumento de la concentración citoplasmática de Ca en células guarda, un aumento que precede al cierre de los estomas (Rudd y Tong, 2001).

La concentración de Ca en las plantas son similares a la concentración de K, en el intervalo de uno a 50 mg g⁻¹ de Ca de materia seca (Dieter, 1984).

La mayor parte del Ca se encuentra en el apoplasto, y donde está presente en la simplasto, tiende a ser almacenada en orgánulos o vacuolas o se une a las proteínas. La concentración de Ca libre en una célula cortical de la raíz es del orden de 0,1 a 1,0 mmol m⁻³ (Clarkson, 1984).

2.6 El Magnesio en las Plantas

El Mg tiene importantes funciones fisiológicas y moleculares en plantas, tales como ser un componente de la molécula de clorofila, un cofactor para muchos procesos enzimáticos asociados con la fosforilación, desfosforilación, y la hidrólisis de diversos compuestos, y como un estabilizador estructural para varios nucleótidos. Los estudios indican que del 15 al 30 por ciento del Mg total en las plantas está asociado con la molécula de clorofila (Marschner, 1995).

El otro 70 a 85 por ciento del Mg en plantas está asociado con el papel de Mg como un cofactor en diversos procesos enzimáticos (Black y Cowan, 1995 (a); Black y Cowan, 1995 (b); Marschner, 1995), la regulación de los canales de la membrana y las proteínas receptor (Matsuda, 1991; White y Hartzell, 1989) , y el papel estructural en la estabilización de las proteínas y las configuraciones de ADN y cadenas de ARN (Horlitz y Klaff, 2000; Ochiai, 1987). Dado que el Mg es un componente integral de la molécula de clorofila y los procesos enzimáticos asociados con la fotosíntesis y la respiración, la asimilación de carbono y transformaciones de energía se ve afectada directamente por el Mg (Barker y Pilbeam, 2007).

El Mg también puede influir en diversos aspectos fisiológicos relacionados con las relaciones de agua de hoja (Carvajal *et al.*, 1999; Rao *et al.*, 1987). En cultivo hidropónico de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.), El aumento de la fertilización de Mg de 0.5 a 10 mM resultó en un aumento en la conductancia estomática y el potencial de turgencia (ψ_p) y una disminución en el potencial osmótico ($\psi\pi$), pero no tuvo ningún efecto sobre el potencial hídrico foliar (ψ_w) (Carvajal *et al.*, 1999).

Por lo que respecta a la función de Mg en la biología molecular, el Mg es un componente integral de ARN, la estabilización de la estructura conformacional de los grupos funcionales cargados negativamente y también neutralizando al mismo tiempo la molécula de ARN (Labuda y Porschke, 1982; Schimmel y Redfield, 1980; Teeter *et al.*, 1980). Además, el Mg sirve como un cofactor para enzimas que catalizan la hidrólisis y formación de enlaces fosfodiéster asociados con la transcripción, la traducción, y la replicación de los ácidos nucleicos (Black y Cowan, 1995 (a); Black y Cowan, 1995 (b)).

La cantidad de Mg acumulada será diferente para distintos órganos de la planta, con una tendencia hacia una mayor asignación de Mg en órganos de transpiración tales como hojas y flores, en lugar de las raíces (Drossopoulos *et al.*, 1996 (a); Drossopoulos *et al.*, 1996 (b); Satti *et al.*, 1996), sin embargo, esta translocación a diferentes partes de la planta puede verse afectada por el estado de otros elementos en la planta (Nenova y Stoyanov, 1999; Sonneveld y Voogt, 1991).

Aunque el Mg se acumula a niveles más altos en los órganos sobre el suelo que en los órganos bajo el suelo, también puede haber diferencias espaciales en la acumulación de Mg dentro de un órgano particular (Mozafar, 1997). En las hojas de maíz, la concentración de Mg disminuyó de la punta de la hoja a la base de la hoja (Mozafar, 1997; Barker y Pilbeam, 2007). La distribución relativa de Mg dentro de las plantas puede ser alterada por las tasas de fertilización de Mg, así como las tasas de fertilización de otros nutrientes. Otras tensiones ambientales, tales como la deficiencia de hierro, también se ha demostrado que modificar el gradiente espacial de las concentraciones de Mg a lo largo de la lámina de la hoja de maíz (Mozafar, 1997).

La concentración de Mg de los tejidos considerados como deficientes, suficiente, o tóxico depende de qué parámetro de crecimiento se está midiendo en los cultivos. En muchos cultivos, la clasificación de la suficiencia de nutrientes se basa en los rendimientos cosechables y la calidad de las partes de la planta comestibles (Walworth y Ceccotti, 1990). En las plantas ornamentales, los valores de suficiencia se basan en la tasa de crecimiento de la planta y la calidad visual de los órganos vegetativos y reproductivos. En el maíz, las concentraciones óptimas de Mg en la hoja se determinaron en un rango entre 0.3 y 0.18 por ciento para los rendimientos máximos de maíz (Walworth y Ceccotti, 1990).

Una descripción tabulados de las concentraciones de Mg para los diferentes cultivos se presenta en el Cuadro 1 (Barker y Pilbeam, 2007).

Cuadro 1. Concentraciones de Mg en diferentes cultivos.

Tipo de cultivo		Rango diagnóstico (%)		
Nombre en latín	Nombre común	Bajo	Suficiente	Alto
<i>Koelreuteria</i> Laxm.	Goldenraintree		0.21–0.31	
<i>Lactuca sativa</i> L.	Lettuce		0.24–3.50	
<i>Lagerstroemia</i> L.	Crepe myrtle		0.23–0.72	
<i>Larix</i> Mill.	Larch		0.11–0.15	

(Barker y Pilbeam, 2007).

2.7 Riego Superficial y Salinidad

El riego localizado, llamado también microirrigación, es la aplicación de agua al suelo en zonas más o menos restringidas, próximas a las plantas, en donde se forman y mantienen unos bulbos con alto contenido de humedad, para lo que se precisan riegos con pequeñas dosis y alta frecuencia (López *et al.*, 1992).

El uso de este método de riego, asociado a la alta carga de sales solubles que contienen las aguas de riego y el suelo, van originando gradualmente una acumulación de sales en la entrehilera de plantación, producto del movimiento característico del frente húmedo del bulbo de mojado (López *et al.*, 1992; Osorio y Céspedes, 2000).

Vermeiren y Jobling (1986) ratifican dos supuestos: uno.- que cuando la carga de agua aplicada es alta, se produce un lavado bajo los puntos de aporte, mientras que las sales se acumulan en los límites de los bulbos; y dos.- que las sales se acumulan en la superficie entre dos puntos de aporte y pueden llegar a una concentración varias veces más elevada que la inicial en el suelo, según la

salinidad del agua. Esta situación se puede explicar por el hecho de que el frente húmedo se desplaza en la interfase suelo-aire, y que esta zona, dependiendo de la evaporación que se produzca, tiene una elevada pérdida de agua. Por otro lado, existe una zona de lavado bajo el punto de aporte de agua y una pequeña acumulación de sales en el área de traslape de los bulbos, la cual puede presentar niveles peligrosos para la germinación de semillas e incluso para el desarrollo de plantas adultas, sobre todo si el lavado no es suficiente.

2.8 Subirrigación

El diseño del sistema de subirrigación parte del principio de que el estrato actúa como una barrera al movimiento vertical del agua, lo cual produce el movimiento lateral de la misma (Renny *et al.*, 2003; Schmal *et al.*, 2011); el ascenso de ésta hasta la zona radical por efecto de la capilaridad, reduce la cantidad de agua necesaria para la producción de plantas de alta calidad, pudiendo utilizar las aguas residuales, y reduciendo la lixiviación de nutrientes en comparación con los sistemas tradicionales de riego por aspersión. Las investigaciones recientes han demostrado beneficios adicionales de subirrigación, tales como una mayor uniformidad de los cultivos y mejorar el rendimiento del trasplante al campo (Schmal *et al.*, 2011).

En subirrigación, una estructura que contiene agua se inunda (figura 4), hasta el contacto del nivel de agua del medio (figura 5). Una vez que se hace

contacto, la acción capilar (la atracción de las moléculas de agua el uno al otro y otras superficies) mueve el agua a través del medio y en todo el contenedor (figura 6) (Landis y Wilkinson, 2004).



Figura 4. La estructura es inundada con agua y/o solución nutritiva hasta cierta altura (Schmal *et al.*, 2011).

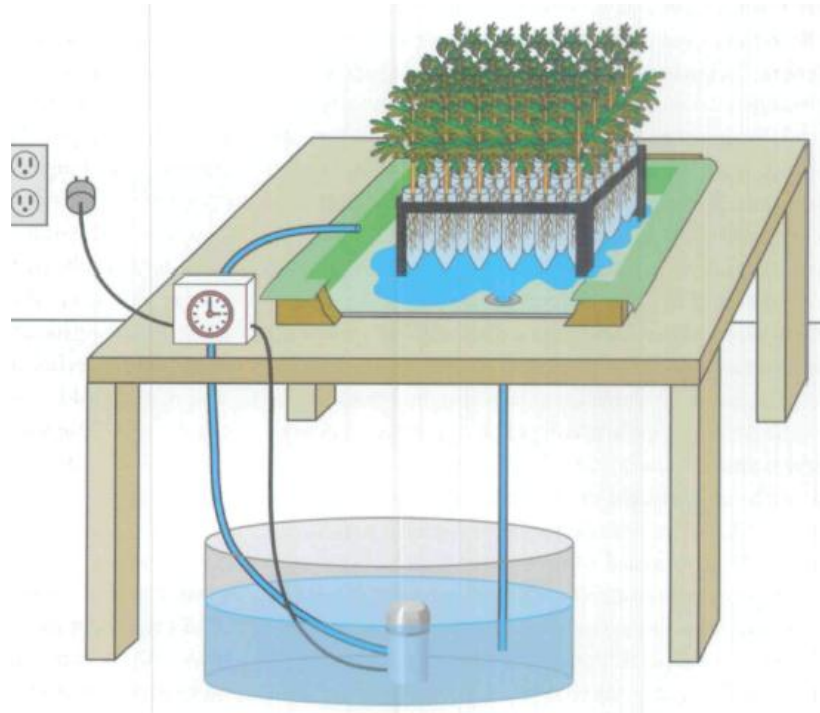


Figura 5. Se inunda hasta hacer contacto con el medio, se deja un tiempo la solución (dependiendo del cultivo y velocidad de absorción), y se drena el sobrante (Schmal *et al.*, 2011).

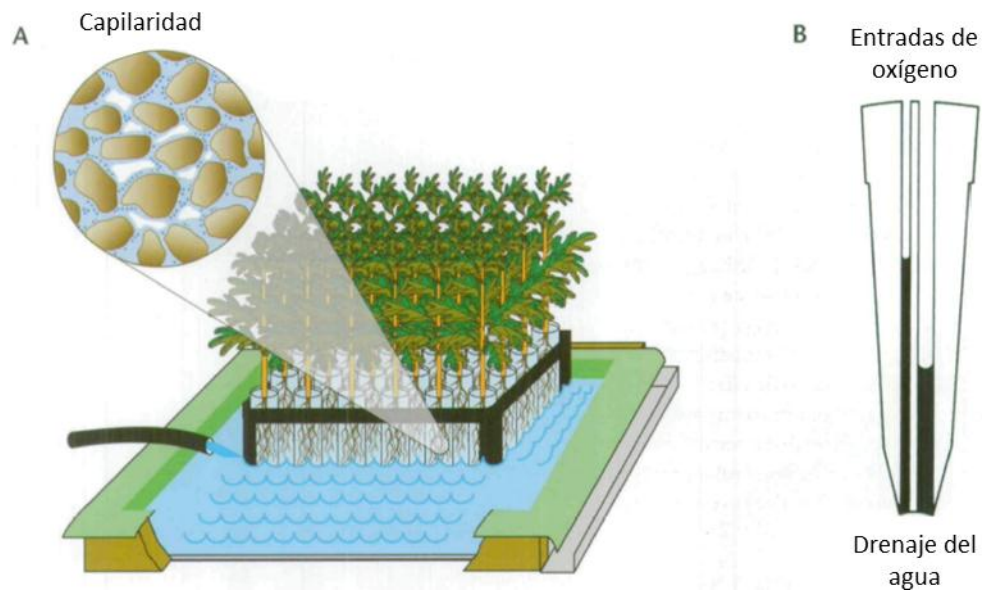


Figura 6. El agua de los recipientes sube por acción capilar (A), y la cantidad y velocidad de absorción de agua dependerá de la porosidad del medio de cultivo, entre más pequeños los poros, será más absorbida (B) (Schmal *et al.*, 2011).

En los sistemas de subirrigación, la salinidad del cultivo debe tener una importancia relevante, y existen factores que se deben de tomar en cuenta, como lo son: el tiempo de inundación, con exceso de agua en el sustrato existe una deficiencia de oxígeno, acumulación de nitritos, toxicidad y por tanto daño a las raíces; sustratos con drenaje insuficiente y poca aireación; acumulación de sales; utilización de soluciones nutritivas inapropiadas con exceso de nitrógeno amoniacal. El manejo de sistema de irrigación debe encaminarse a la minimización de todos los factores que afecten el deterioro del sistema radicular del cultivo, en general habría que considerar: graduar el tiempo de duración de la inundación para que solo exista un flujo unidireccional del riego, inundación y movimiento ascendente de la solución por acción capilar; evitar riegos aéreos o de superficie que podrían expandir enfermedades; usar sustratos y macetas adecuados a la subirrigación; controlar la evolución del sustrato (pH, CE y nivel de nitrógeno); evitar el uso de aguas con un contenido superior a 30-35 ppm de Na y Cl⁻ (Casas, 1996).

Shuhrat en 2011 cita en su artículo a S. Isaev (2007), mencionando que de acuerdo a los estudios en Fergane central, a expensas del sistema de subirrigación, la productividad de algodón se incrementó, y el número de riegos disminuyó a 1.5 y durante más tiempo.

Santamaria *et al.*, (2003), comparó el riego por goteo con la subirrigación a través de un cultivo de tomate de cereza, reportando que en el método de subirrigación, en la capa superior del sustrato se aumentó la CE durante el ciclo del cultivo en comparación con el riego por goteo, alcanzando los 7.7 y 3.4 dS

m⁻¹, respectivamente. Reporta que el rendimiento de tomate fue menor en el método subirrigado, pero la calidad era mayor en cuanto a materia seca, sólidos solubles totales y acidez. Por otra parte, con el método subirrigado, la clase de tamaño más frecuente de los frutos fue de un diámetro de entre 25-35 mm (considerado óptimo para el tomate cereza), además de mencionar que el uso eficiente del agua fue mayor con el método subirrigado en comparación con el de riego por goteo.

La integración de esta tecnología en los sistemas de riego subterráneo podría disminuir aún más el consumo del agua, los insumos de trabajo, y evitar el exceso de riego de los cultivos. Se requiere un mantenimiento mínimo durante todo el ciclo de cultivo para mantener un sistema de subirrigación funcionando correctamente (Schmal *et al.*, 2011).

Según Richards y Reed (2004) en su trabajo sobre impacientes Nueva Guinea en un sistema de subirrigación, menciona que todos los tratamientos aplicados mostraron una CE significativamente mayor en la capa superior que en el medio y capas inferiores del sustrato. Kent y Reed (1996) al utilizar un sistema de subirrigación en impacientes Nueva Guinea (*Impatiens hawkeri* Bull) y el lirio de la paz (*Spathiphyllum schott*) reafirmaron que la CE se mantuvo baja en las capas media e inferior, mientras que el estrato superior fue de 2 a 5 veces mayor que los estratos inferiores.

Sin embargo, en otra investigación muestra como el crecimiento y la calidad de la impacientes Nueva Guinea disminuyó a medida que aumentó el

nivel de salinidad, con una reducción del crecimiento del 75-80 por ciento conforme a los tratamientos establecidos de altos niveles de estrés causados por la salinidad, mencionan también que la distribución de la masa de raíces fue de 10-50-40 por ciento en la parte superior, media e inferior del estrato respectivamente, indicando que en el tratamiento más salino fue el nivel medio donde se presentó la mayor masa de raíces (80 por ciento) mientras que la masa de raíz en la capa superior e inferior se redujo a 5-15 por ciento, respectivamente. La CE del medio de cultivo fue alta en la capa superior en todos los tratamientos, pero solo superó los niveles máximos recomendados en las capas media e inferior (Reed y Todd, 1998).

Blessington y Reed (2004) al trabajar con impacientes Nueva Guinea (*Impatiens Hawkeri* Bull), vinca (*Catharanthus roseus* L.) y petunia (*Petunia xhybrida*) resaltan que al utilizar un sistema de subirrigación recirculante, la CE del medio de cultivo se mantuvo por debajo del nivel recomendado de 1.2 dS m⁻¹ en la capa inferior y media, sin embargo, en la parte superior del medio de crecimiento, la CE estaba por encima de los niveles recomendados.

Whitcher *et al.* (2005) con Nueva Guinea (*Impatiens hawkeri* Bull) mencionan que la CE de los medios de crecimiento fue significativamente mayor en la capa superior a diferencia que el estrato medio e inferior. Por otro lado, Douglas (2001) al trabajar con nochebuena menciona que al analizar las muestras superiores del medio de crecimiento, encontró que la CE fue superior a las muestras inferiores en el sistema de subirrigación.

Incrocci *et al.* (2006) realizaron un trabajo en tomate cultivado en turba con perlita en un sistema de subirrigación, con una solución nutritiva que contenía 10 mol m^{-3} de NaCl; la solución nutritiva se reemplazaba cuando la CE superaba los 6 dS m^{-1} , ellos mencionan que el movimiento hacia arriba del agua en el sustrato, junto con la absorción selectiva de minerales por las raíces, causa una acumulación salina en la región superior del sustrato, asociado a la acumulación de sodio. Bumgarner *et al.* (2008) utilizando un sistema de subirrigación en la producción de plántulas de (*Quercus rubra* L.) mencionan que este sistema aumentó la CE y disminuyó el pH en la parte superior del sustrato, sin encontrar efecto contrario en el estrato inferior.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización geográfica del trabajo de investigación

El presente trabajo de investigación se realizó en el invernadero de la Maestría en Ciencias en Horticultura, en las instalaciones del Departamento de Horticultura, de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN), cuya ubicación se encuentra al sur de la ciudad de Saltillo, Coahuila, en las coordenadas geográficas: 25° 22´ de latitud norte, 101° 00´ de longitud oeste del meridiano de Greenwich y a una altitud de 1742 msnm.

3.2 Material genético

Se utilizó plántula de lechuga (*Lactuca sativa* L.) cv. Iceberg, que tiene una característica un poco tosca, de color verde intenso, hojas grandes y envolventes que adquieren características de repollo; midiendo de 15 ó más centímetros de diámetro.

3.3 Metodología

3.3.1 Preparación del sustrato

Se preparó sustrato para llenar 144 bolsas de vivero de 20 litros, el cual consistía en una relación de 80 por ciento de Peat Moss (Berger) y 20 por ciento de perlita; durante la preparación del sustrato se añadió 3.5 gramos de bicarbonato de sodio por cada litro de peat moss con el fin de aumentar el pH de 4.5 a seis.

3.3.2 Trasplante

El trasplante de plántulas de lechuga se realizó el 10 de Octubre de 2012, depositando una plántula por cada contenedor, utilizando el sistema a tresbolillo, con contenedores seguidos uno del otro y 1.40 metros entre hileras.

3.4 Tratamientos

Los tratamientos consistieron en soluciones nutritivas con concentraciones variantes de Ca-Mg-SO_4^{2+} y que se muestran en el Cuadro 2. Estos tratamientos se aplicaron tanto en un sistema de riego superficial como en uno por subirrigación.

Los restantes nutrimentos se mantuvieron constantes y correspondieron a la concentración de la solución de Hoagland que se muestra en el Cuadro 3.

Cuadro 2.

Tratamiento	Ca	Mg ppm	SO ₄ ²⁺	pH	CE dS m ⁻¹
1 (Control)	160	40	32	5.96	2.19
2	240	63	136	5.78	2.50
3	300	85	240	5.70	2.84
4	400	122	320	5.66	3.30
5	600	243	640	5.51	4.55
6	800	729	960	6.75	6.81

Cuadro 3. Concentración constante de la solución nutritiva de Hoagland durante los tratamientos.

Elemento	Concentración ppm
N	224
P	62
K	235
B	0.27
Mn	0.11
Zn	0.13
Cu	0.032
Mo	0.05
Fe	1.12

3.5 Manejo agronómico del cultivo de lechuga

3.5.1 Nutrición y riegos

La nutrición de las plantas se realizó mediante fertilizantes químicos, los cuales se aplicaron en el sistema de riego. Los fertilizantes utilizados fueron: Fosfato monopotásico [KH₂PO₄], nitrato de potasio [KNO₃], nitrato de calcio [Ca(NO₃)₂·5H₂O], ácido nítrico [HNO₃], sulfato de magnesio [MgSO₄·7H₂O], cloruro de calcio [CaCl₂], ácido sulfúrico [H₂SO₄], y Foltron para los microelementos.

Los riegos se efectuaron según las necesidades del cultivo, y durante los primeros 12 días se estuvo regando con una solución Hoagland al 100 por ciento sin modificación para los tratamientos, posteriormente en el día 13 después de haberse trasplantado se inició con el primer riego ya con los tratamientos establecidos.

La duración de los riegos fue de 20 minutos para el sistema de subirrigación, administrando una lámina de 12 cm (15.5 L) de solución nutritiva en cada uno de los contenedores utilizados para la subirrigación, y teniendo una recuperación de aproximadamente 10-13 L por tratamiento dependiendo de la etapa fenológica del cultivo. Para las plantas del riego superficial se aplicaron de tres a cuatro litros por cada contenedor dependiendo de la etapa fenológica.

3.5.2 Cosecha

La cosecha de lechugas se realizó cuando ya había alcanzado su madurez comercial, llevando un tiempo de trasplante a cosecha de 70 días.

3.6 Variables evaluadas

Las variables evaluadas en este trabajo de investigación se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Parámetros evaluados durante el ciclo del cultivo de lechuga en condiciones de agricultura protegida y salinidad.

Parámetros evaluados	Materiales utilizados
Diámetro de la planta	Se determinó a los 42 días después del trasplante (DDT).
Peso fresco	El día de la cosecha (70 DDT) se pesó el fruto en una balanza digital.
Turgencia	El día de la cosecha (70 DDT) se determinó la turgencia del fruto con la ayuda de un penetrómetro de 0-13 Kg.
Fotosíntesis	La fotosíntesis se determinó con un equipo de medición portátil de fotosíntesis modelo LI-6400, (LI-COR, inc. Lincoln, Nebraska, E. U.), a los 44 DDT, a las 13:30-14:00 horas en la 2 ^{da} -3 ^{ra} hoja del exterior al interior.
pH sustrato	El pH del sustrato se determinó con un potenciómetro de mano de HANNA Instruments, tomando tres muestras por contenedor (estrato inferior, medio, superior) a tres fechas diferentes (28-56-70 DDT).
CE sustrato	La CE del sustrato se determinó con un potenciómetro de mano de HANNA Instruments, tomando tres muestras por contenedor (estrato inferior, medio, superior) a tres fechas diferentes (28-56-70 DDT).
Análisis mineral	Se realizó un análisis mineral de tejidos en la parte aérea de tres plantas por repetición. Las muestras fueron lavadas con agua destilada e introducidas en bolsas de papel y llevadas a un horno de secado a 70 ° C, por 72 horas. El material seco se llevó a molienda en un molino Analytical Mill (marca Tekmar Co. modelo A-10). Las muestras de las plantas se homogeneizaron para proceder a determinar la concentración de nitrógeno (N) por el método de Kjeldhal. La concentración de K en los tejidos se determinó con un flamómetro Corning 400, tomando una muestra del digestado obtenido a partir de 0.5 g de muestra molida (Alcántar y Sandoval, 1999). La concentración de fósforo (P), Ca, y Mg se determinaron por espectrometría de emisión de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES VARIAN, modelo Liberty) utilizando el extracto diluido (1:50) obtenido con la digestión ácida de las muestras secas.

3.7 Diseño experimental

El experimento se estableció de acuerdo a un diseño experimental factorial en bloques completamente al azar, con seis soluciones nutritivas, dos sistemas de riego y cuatro repeticiones. Cada unidad experimental estuvo constituida por tres contenedores con una planta por contenedor, contando con un total de 48 unidades experimentales. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza y prueba Tukey con SAS v. 8.0.

IV. RESULTADOS

4.1 Diámetro de la planta

El análisis de varianza mostró que estadísticamente hay un efecto significativo en la interacción entre solución nutritiva y el sistema de riego, el sistema de irrigación, así como en todas las soluciones nutritivas aplicadas y entre ambos tipos de riego (Fig. 4.1).

En general, el diámetro de la lechuga fue mayor en las plantas con riego superficial en comparación con aquellas con subirrigación (Fig. 4.1), sin embargo, esta diferencia fue más marcada cuando las plantas se irrigaron con soluciones conteniendo bajas concentraciones de Ca-Mg-SO_4^{2+} ($\leq 300-85-240$). Con niveles más altos de Ca-Mg-SO_4^{2+} en la solución nutritiva la diferencia entre sistemas de riego fue menos marcada. En las plantas tratadas con 240-63-136 y 300-85-240 fueron las de mayor diámetro cuando se regaron superficialmente, sin embargo, en plantas subirrigadas no se detectó algún efecto marcado en el diámetro de las lechugas ya que este no fue afectado sino hasta cuando la solución rebasaba una concentración de Ca-Mg-SO_4^{2+} 600-243-640 ppm.

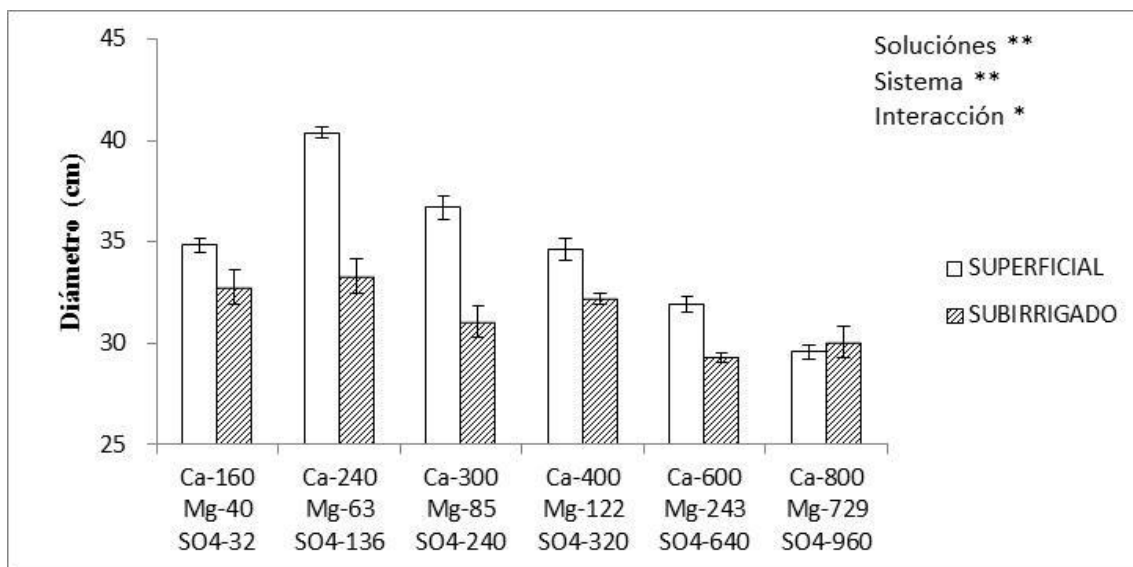


Figura 4.1. Diámetro de plantas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.

4.2 Peso fresco

Fue afectado significativamente por las soluciones nutritivas dentro de ambos tipos de riego (Fig. 4.2). En el sistema irrigado se muestra una clara diferencia entre las plantas que recibieron la solución nutritiva $\leq 240-63-136$ en comparación con el resto, mostrando un peso fresco de 43 por ciento superior a las plantas que recibieron la solución 800-729-960.

En la Figura 4.2 se observa que en el sistema de subirrigación las plantas irrigadas con la solución 240-63-136 fueron las que mostraron mayor peso fresco, 20 por ciento superior al testigo, y 58 por ciento mayor a las plantas con la solución nutritiva más salina (800-729-960). Los resultados muestran que en ambos tipos de irrigación se requiere de concentraciones de Ca-Mg- SO_4^{2+} de 240-63-136 ppm para obtener un mayor peso fresco. El

sistema de subirrigación resultó ser una buena opción para que las plantas puedan crecer aún en condiciones de altos niveles de Ca-Mg-SO_4^{2+} ya que aun cuando la solución nutritiva utilizada contenga niveles $\leq 400-122-320$ ppm, el peso fresco de la lechuga no se ve afectado de manera significativa.

Las plantas de subirrigación con la solución 400-122-320 muestran mayor peso fresco que las plantas con riego superficial, dejando en claro que a estas concentraciones de Ca-Mg-SO_4^{2+} el sistema de subirrigación es una buena opción para mitigar el efecto por toxicidad de sales en las plantas (Figura 4.2).

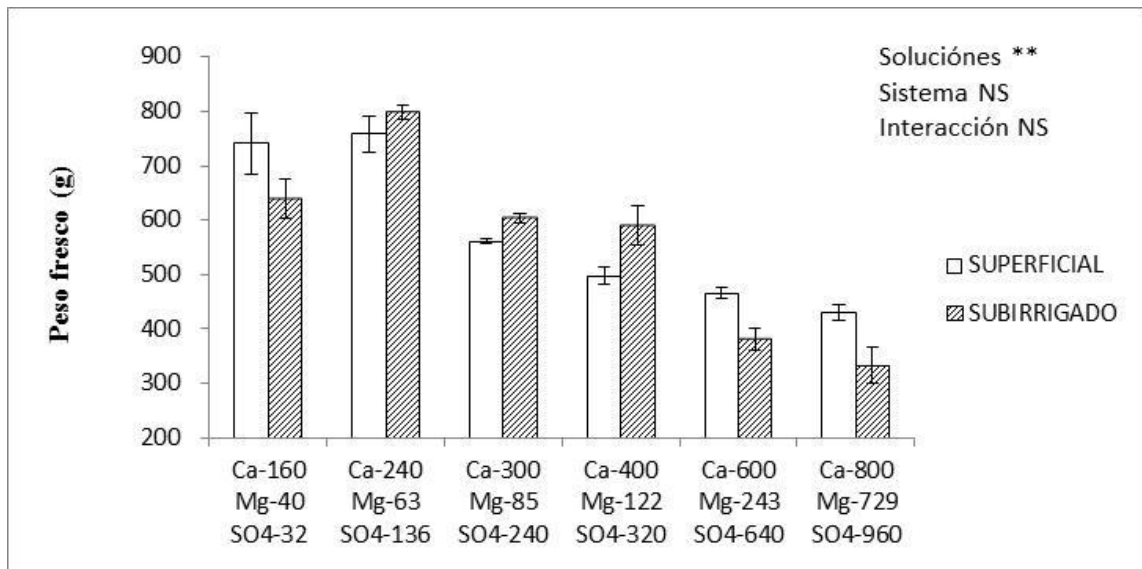


Figura 4.2. Peso fresco de plantas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.

4.3 Turgencia

En la Figura 4.3 se muestra una diferencia significativa entre tipos de riego y las soluciones nutritivas. En general, las plantas con riego superficial mostraron una mayor turgencia que aquellas subirrigadas. Las plantas irrigadas con la solución 300-85-240 son las que presentan menor turgencia, mientras que las plantas subirrigadas con la solución 600-243-640 muestra una turgencia superior al resto, aumentando su rigidez a altas concentraciones de salinidad. Las plantas almacenan grandes cantidades de Ca en las vacuolas de las células, teniendo su mayor eficiencia de almacenamiento cuando son subirrigadas a concentraciones de Ca-Mg-SO₄²⁺ de 600-243-640.

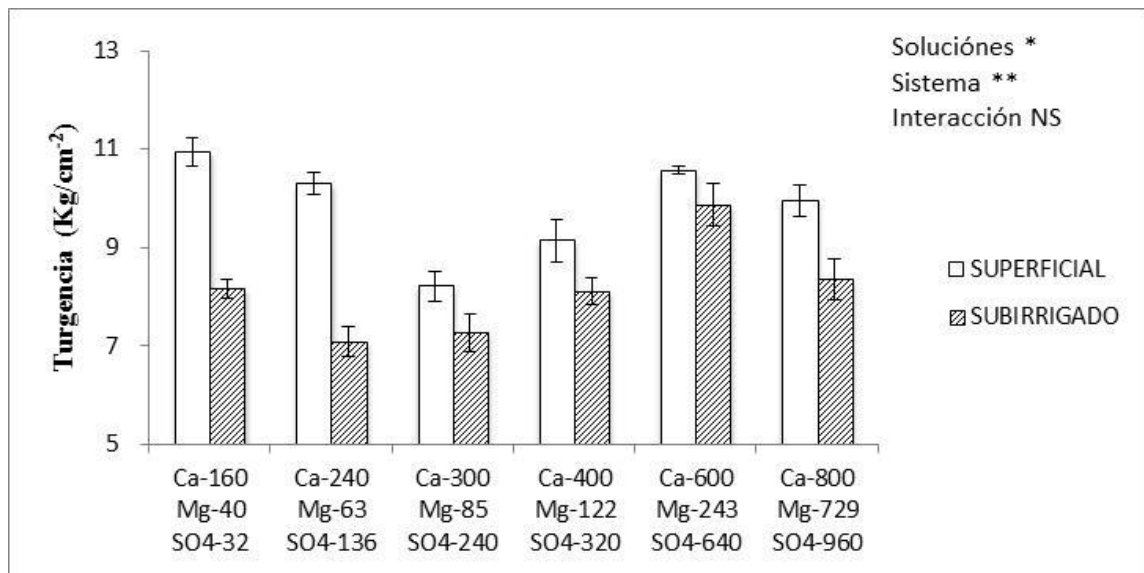


Figura 4.3. Turgencia de plantas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO₄²⁺ (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.

4.4 Fotosíntesis

La actividad fotosintética no fue afectada por las soluciones nutritivas y los tipos de riego, sin embargo, numéricamente si existe una diferencia entre las plantas subirrigadas con 240-63-136; 300-85-240 y 600-243-640 con mayor actividad fotosintética, superando a la detectada en plantas con tales soluciones pero regadas superficialmente en un 24, 25 y 28 por ciento respectivamente (Figura 4.4). En plantas irrigadas la máxima diferencia se observa entre el testigo, 34 por ciento mayor actividad fotosintética a las plantas del tratamiento 600-243-640.

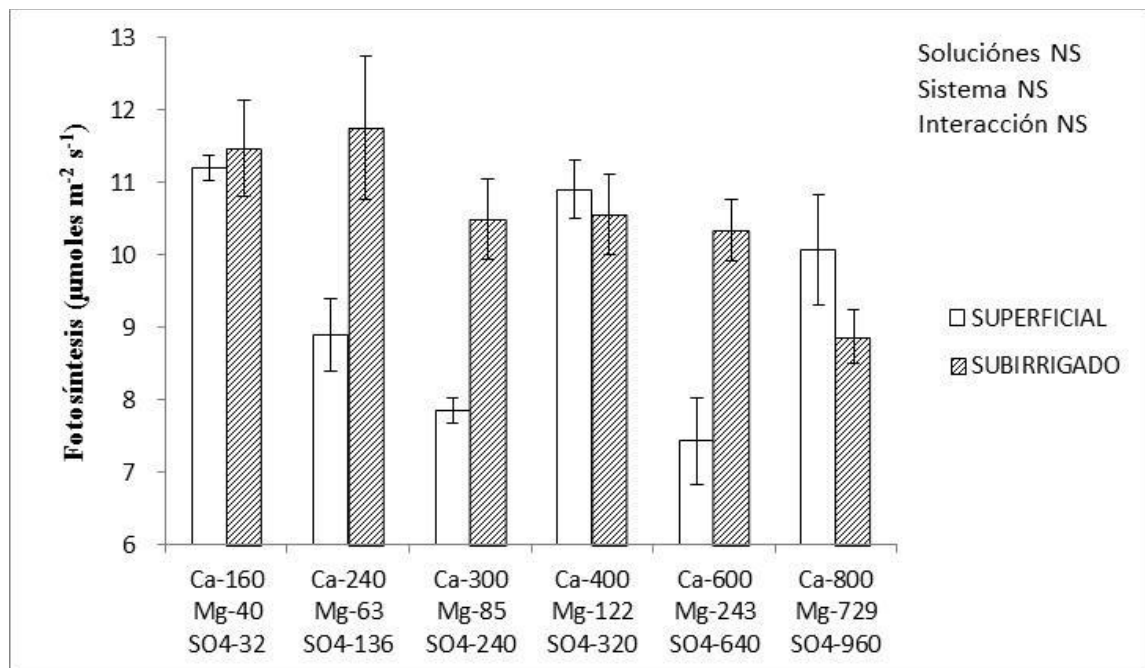


Figura 4.4. Fotosíntesis de la hoja de plantas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO₄²⁺ (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.

En las plantas subirrigadas con soluciones nutritivas $\leq 600-243-640$ muestran una actividad fotosintética similar, disminuyendo ésta en forma drástica al aumentar a $800-729-960$, mientras que las plantas irrigadas muestran una tendencia de disminución de la actividad fotosintética conforme aumenta la salinidad en las soluciones nutritivas hasta el tratamiento $300-85-240$.

4.5 Conductancia de la hoja

La conductancia se ve afectada significativamente entre el tipo de riego y las soluciones nutritivas del sistema de riego superficial (Figura 4.5), sin embargo, las plantas tratadas con el riego superficial no muestran una tendencia clara, aspecto diferente en las subirrigadas donde presentan una mayor actividad de conductancia en comparación con las de riego superficial, además de presentar una tendencia de disminución conforme va aumentando la concentración de sales en las soluciones nutritivas de los tratamientos, con una diferencia del 51 por ciento entre las plantas testigo y las regadas con Ca-Mg-SO_4^{2+} a $800-729-960$ ppm. En general, las plantas subirrigadas mostraron una mayor conductancia que las plantas con riego superficial.

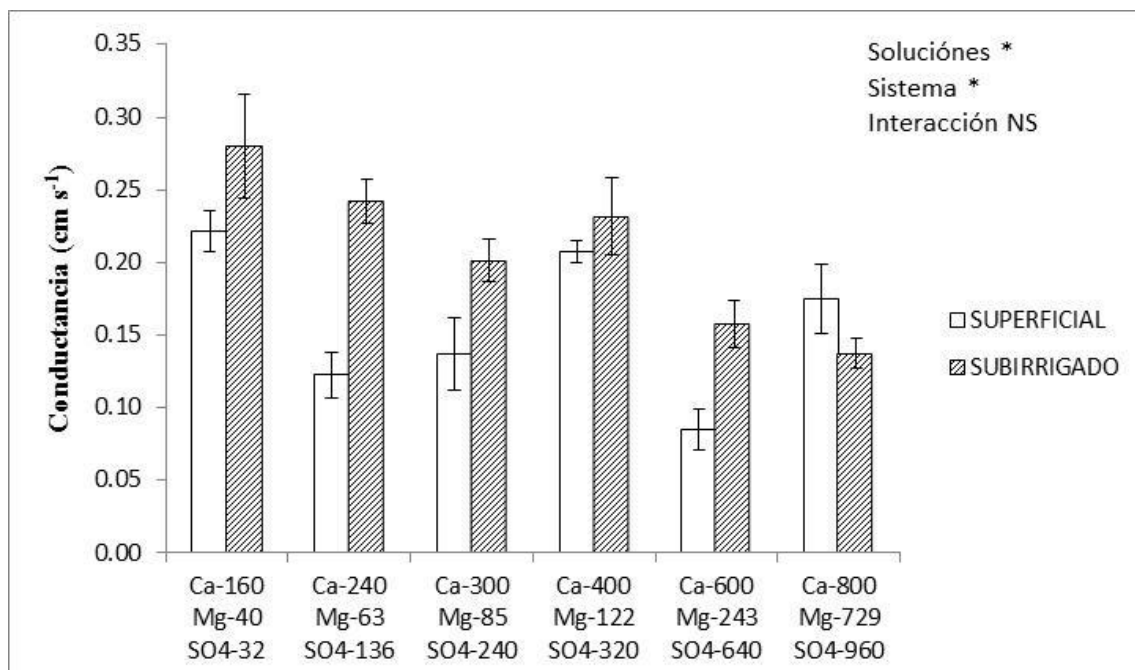


Figura 4.5. Conductancia de la hoja de plantas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.

La máxima diferencia entre sistemas de riego se da en las plantas donde se aplicó la solución nutritiva 240-63-136, la cual registra una diferencia en la actividad de conductancia del 43 por ciento y una mínima del 10 por ciento correspondiente a las plantas donde se irrigó con 400-122-320 (Figura 4.5).

4.6 Tasa de transpiración

Los tratamientos a altas concentraciones de sales afectan la tasa de transpiración entre las plantas de los dos tipos de riego y los tratamientos de ambos sistemas de forma significativa, tal como se observa en la Figura 4.6, donde las plantas del sistema de subirrigación muestran una mayor actividad

transpiratoria en la mayoría de los tratamientos. Al aumentar la concentración salina en la solución nutritiva, va disminuyendo la tasa de transpiración hasta llegar a un 44% menor que la tasa de transpiración de las plantas testigo, dejando en claro que a soluciones ≥ 600 -243-640 se afecta la tasa de transpiración significativamente.

Las plantas del sistema de riego superficial no muestran una tendencia clara, sin embargo es muy similar la mostrada en la conductancia estomática (Figura 4.6), mientras que la diferencia entre tipo de riego se da porque las plantas del sistema de subirrigación en general muestran mayor tasa de transpiración que las plantas irrigadas.

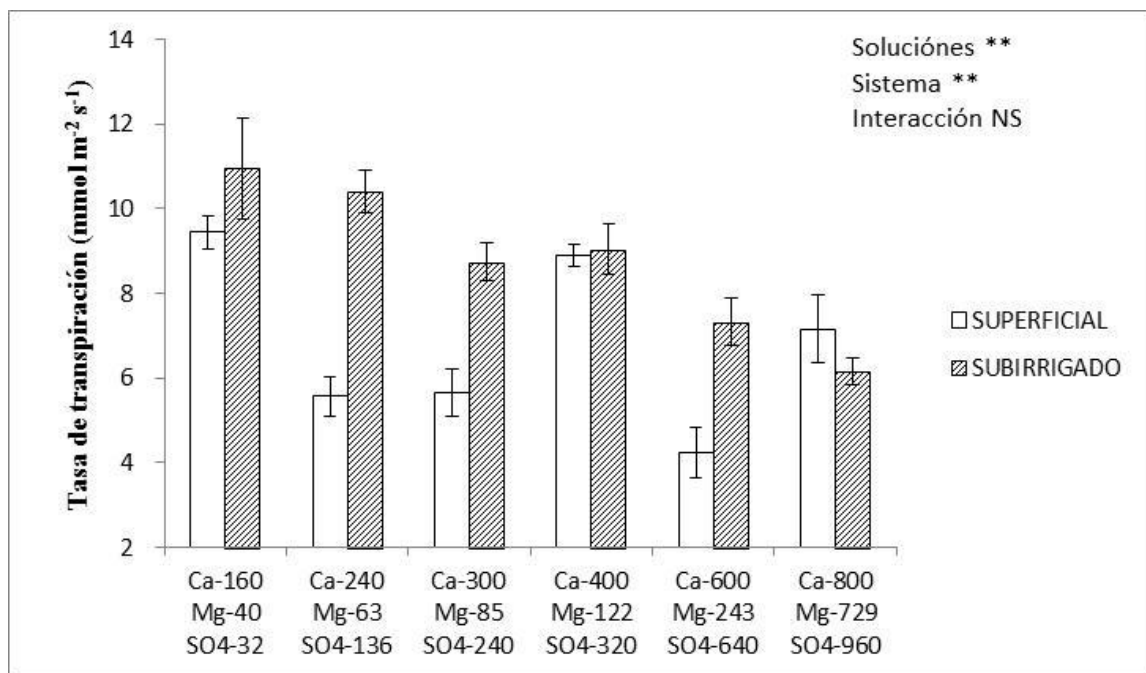


Figura 4.6. Tasa de transpiración de la hoja de plantas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO₄²⁺ (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.

4.7 pH del sustrato: estrato inferior

En general, el pH del estrato inferior del sustrato fue disminuyendo al pasar del primer al tercer muestreo independientemente del sistema de riego empleado: sin embargo, esta disminución es más drástica en plantas tratadas con soluciones con las más altas concentraciones de Ca-Mg- SO_4^{2+} . Los análisis estadísticos muestran que existe diferencia significativa entre las soluciones nutritivas aplicadas en los tres muestreos realizados, indicando que al aplicar la solución nutritiva $\geq 400-122-320$, el pH se ve disminuido de manera significativa conforme se hacen los riegos más frecuentes (tercer muestreo), mientras que los tratamientos $\leq 300-85-240$ se muestran menos afectados por la salinidad aplicada en la solución nutritiva.

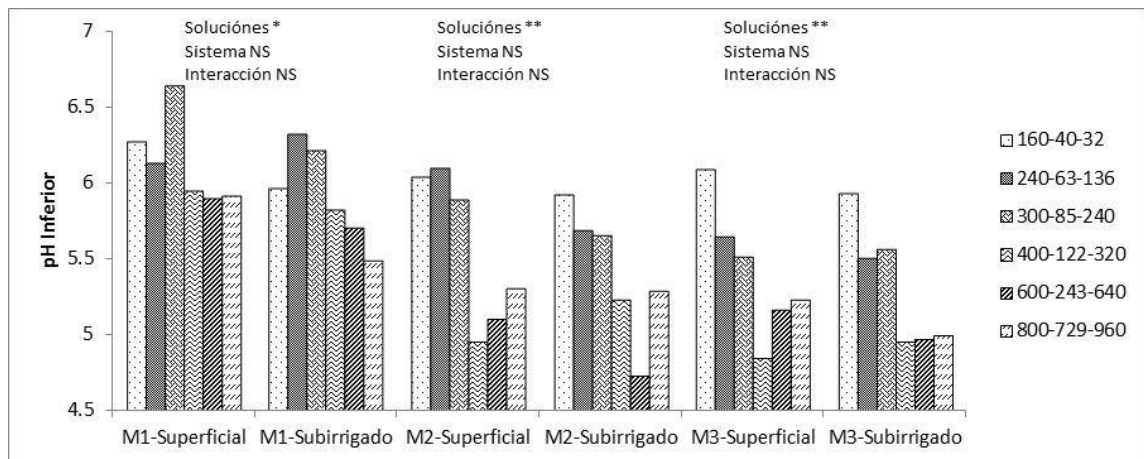


Figura 4.7. pH del estrato inferior del sustrato en tres muestreos bajo dos tipos de riego y soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm).

4.8 pH del sustrato: estrato medio

Las altas concentraciones de Ca-Mg-SO_4^{2+} en las soluciones nutritivas afectaron significativamente el pH del estrato medio del sustrato, llegando a existir una interacción al finalizar el ciclo de crecimiento (tercer muestreo), donde la alta salinidad de la solución junto con el diferente tipo de riego llega a causar que el pH del sustrato baje considerablemente en los tratamientos ≥ 400 -122-320 en plantas con el sistema de riego superficial y de subirrigación (Figura 4.8).

La alta concentración de sales hace que conforme aumenta el Ca-Mg-SO_4^{2+} en la solución nutritiva disminuye el pH del sustrato en plantas subirrigadas, observándose este efecto desde el primer muestreo.

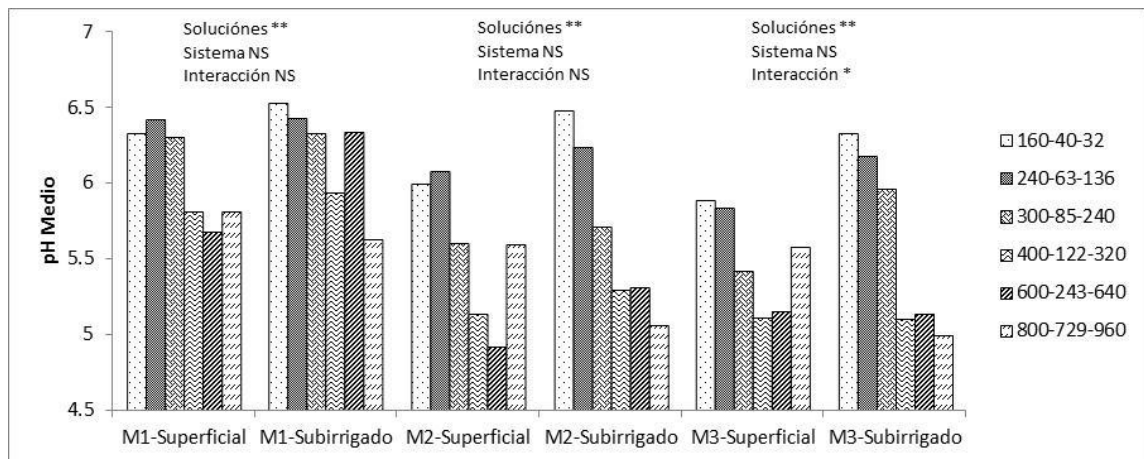


Figura 4.8. pH del estrato medio del sustrato en tres muestreos bajo dos tipos de riego y soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm).

4.9 pH del sustrato: estrato superior

El pH del sustrato del estrato superior es afectado de forma significativa por las soluciones nutritivas, el tipo de riego y la interacción en casi todos los muestreos realizados; en la Figura 4.9 se observa como el tipo de riego y las diferentes concentraciones de Ca-Mg-SO_4^{2+} disminuyen el pH del sustrato principalmente en los tratamientos $\geq 400-122-320$ del sistema de subirrigación, tendencia similar en el riego superficial a excepción del tratamiento 800-729-960, el cual presenta un pH similar a los de $\leq 300-85-240$. El sistema de subirrigación muestra un pH del sustrato más alto que el riego superficial en la mayoría de los tratamientos, dejando en claro como este sistema puede disminuir la acidez del sustrato, afectando de esta forma la asimilación de nutrientes (Figura 4.9).

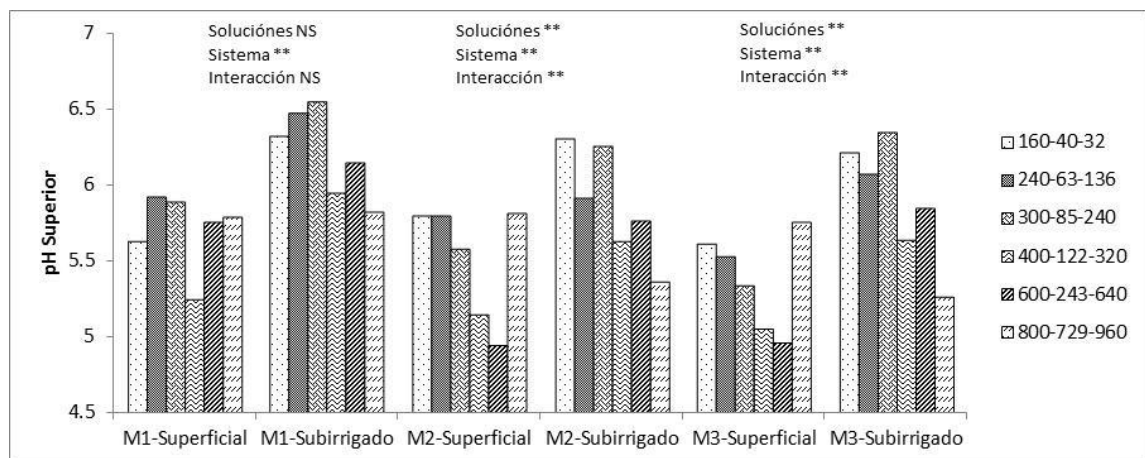


Figura 4.9. pH del estrato superior del sustrato en tres muestreos bajo dos tipos de riego y soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm).

4.10 CE del sustrato: estrato inferior

Las diferentes concentraciones de Ca-Mg-SO_4^{2+} afectan de manera significativa la CE del sustrato, al igual que el tipo de riego en el segundo muestreo.

En la Figura 4.10 se puede observar como después de aplicar los primeros riegos con los tratamientos, el sistema de subirrigación concentra más Ca-Mg-SO_4^{2+} en el estrato inferior que el sistema de riego superficial en la mayoría de los tratamientos, sin embargo, en los siguientes muestreos se puede observar como el sistema de riego superficial aumenta la CE por encima de la detectada en el sustrato de plantas con subirrigación.

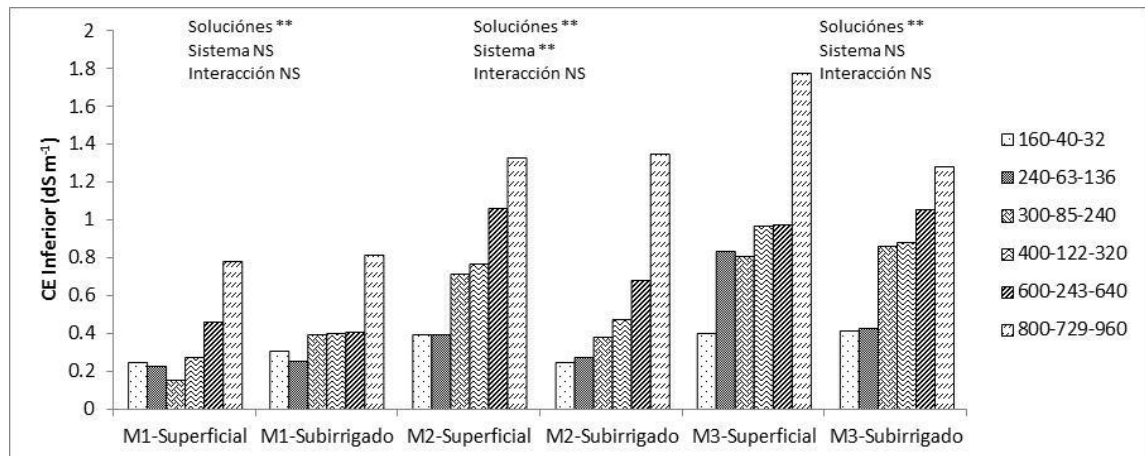


Figura 4.10. Conductividad eléctrica (CE) del estrato inferior del sustrato en tres muestreos bajo dos tipos de riego y soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm).

4.11 CE del sustrato: estrato medio

Al igual que el estrato inferior, las diferentes concentraciones de Ca-Mg-SO₄²⁺ afectan de manera significativa la CE del sustrato en el nivel medio, al igual que el tipo de riego en el segundo muestreo. En la Figura 4.11 se puede observar como el riego superficial aumenta la CE del sustrato en la mayoría de los tratamientos por encima del sistema de subirrigación, diferencias presentadas a partir del segundo muestreo, donde se observa que al aumentar la concentración de Ca-Mg-SO₄²⁺ en las soluciones nutritivas, aumenta de igual manera la CE en este estrato. Por el contrario, la subirrigación estuvo asociada con una menor CE presentada en la mayoría de los tratamientos en comparación al sistema de riego superficial (Figura 4.11).

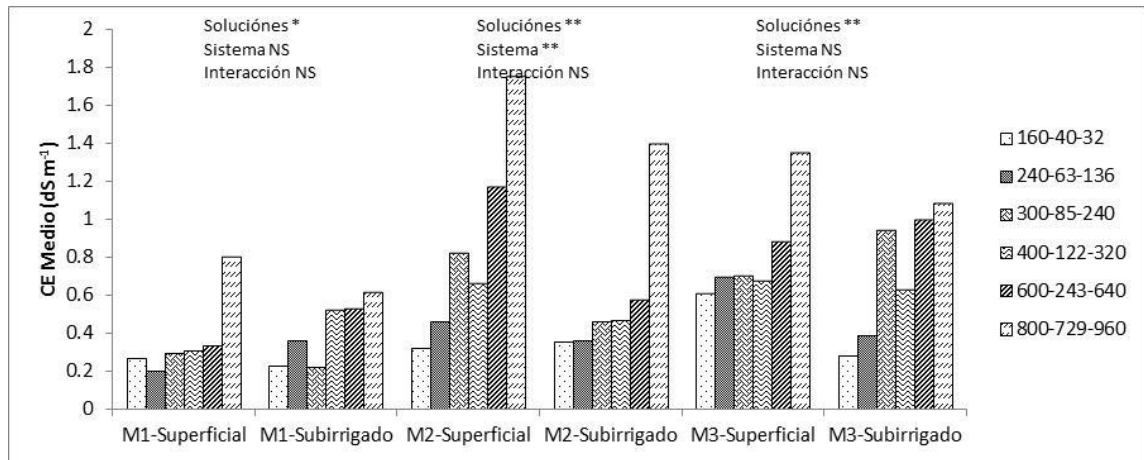


Figura 4.11. Conductividad eléctrica (CE) del estrato medio del sustrato en tres muestreos bajo dos tipos de riego y soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO₄²⁺ (ppm).

4.12 CE del sustrato: estrato superior

Las soluciones nutritivas aplicadas al cultivo, junto con el tipo de riego, afectaron de forma significativa la CE del estrato superior del sustrato. En la Figura 4.12 se puede observar como todos los tratamientos aplicados aumentan la CE del sustrato del sistema de subirrigación, superando a la CE cuando se utilizó el riego superficial. Al realizarse el primer muestreo, se puede observar como no se muestra una tendencia clara de la forma en que actúan las sales de las soluciones en los sistemas de irrigación, sin embargo, a partir del segundo muestreo, se puede observar como la tendencia es a aumentar las cantidades de sales en el nivel superior de los tratamientos donde se aplicó Ca-Mg-SO_4^{2+} a $\geq 400-122-320$ de ambos sistemas de riego; al finalizar el ciclo del cultivo, se observa como el sustrato del sistema de subirrigación concentra más sales en todos los tratamientos por encima del riego superficial, marcando la diferencia en las soluciones $\geq 300-85-240$, mientras que en el riego superficial solo se observa en los tratamientos $\geq 600-243-640$ (Figura 4.12).

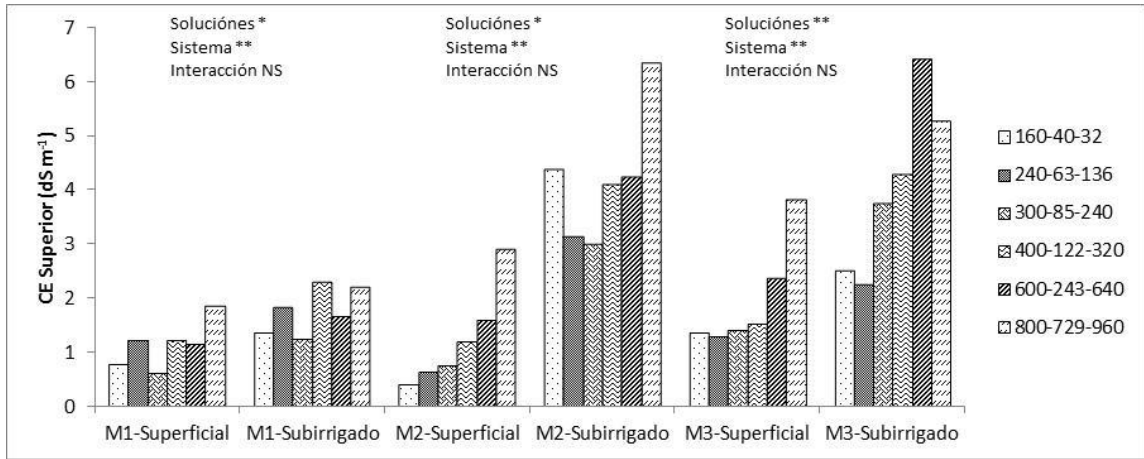


Figura 4.12. Conductividad eléctrica (CE) del estrato superior del sustrato en tres muestreos bajo dos tipos de riego y soluciones nutritivas con diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm).

4.13 Análisis mineral para nitrógeno y fósforo

La alta salinidad de la solución nutritiva no afecta significativamente el porcentaje de nitrógeno (N) y P (Figura 4.13) dentro de los tejidos de la planta, pudiendo observarse como los tratamientos no muestran una tendencia clara a diferentes concentraciones de sales y en diferente sistema de irrigación.

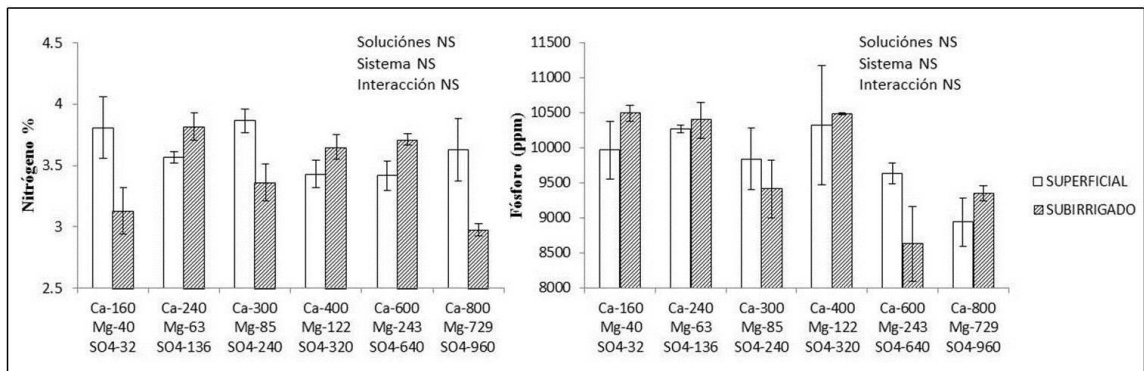


Figura 4.13. Concentración de nitrógeno(N) y fósforo (P) en hojas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.

4.14 Análisis mineral para potasio

La salinidad en la solución nutritiva afectó significativamente la concentración de K entre tratamientos y sistema de riego (Figura 4.14). En plantas con los tratamientos con alta salinidad fueron los que concentran más K cuando se regaron superficialmente, principalmente en soluciones con 400-122-320 y 600-243-640, mientras que los tejidos de las plantas que fueron subirrigadas y recibieron los tratamientos 400-122-320 y 800-729-960 fueron las que acumulan mayor K entre sus células.

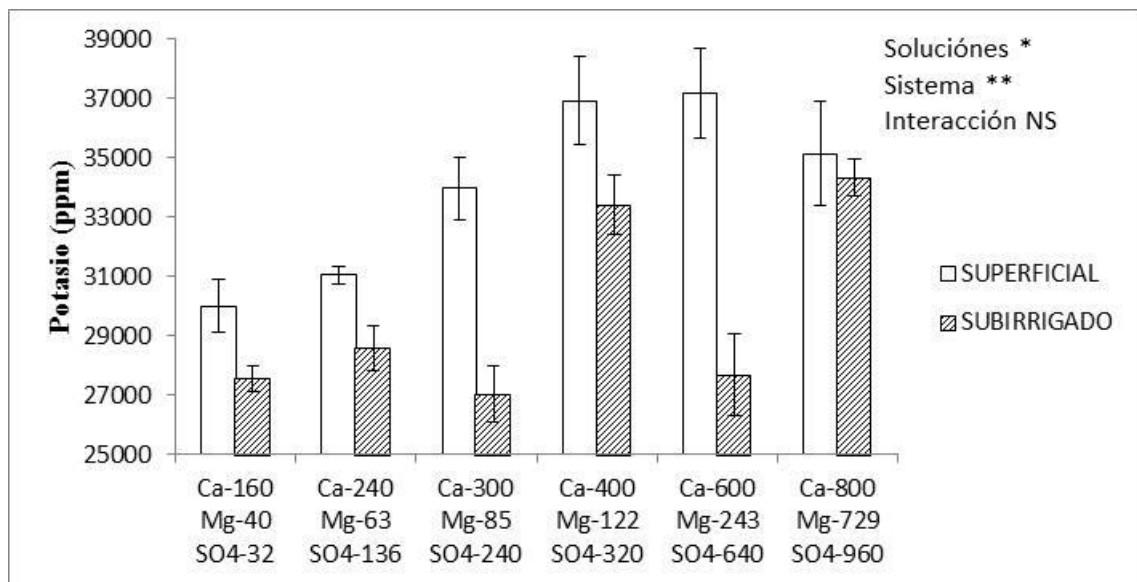


Figura 4.14. Concentración de potasio (K) en hojas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.

La diferencia más contrastante de acumulación de K entre tratamientos dentro del tejido vegetal se da en el sistema de subirrigación con un 21 por

ciento mayor concentración de K que en plantas con riego superficial, mientras que en el sistema de riego superficial la diferencia de acumulación máxima es de 19 por ciento; claramente se puede observar como las plantas en el sistema de riego superficial acumula mayor K entre sus tejidos a diferentes concentraciones de salinidad, llegando a concentrar un promedio de 11 por ciento más que en plantas en el sistema de subirrigación (Figura 4.14).

4.15 Análisis mineral para calcio

Las diferentes concentraciones de Ca en la solución nutritiva afectaron significativamente la acumulación de este elemento dentro del tejido vegetal, con diferencias entre soluciones nutritivas, sistemas de riego, y la interacción entre ambos factores; el Ca interacciona con el sistema de riego y los tratamientos aumentando su acumulación en los tejidos conforme aumenta la salinidad en cada tratamiento del sistema de subirrigación, la tendencia es similar en el sistema de riego superficial, a diferencia del tratamiento 800-729-960, en el cual disminuye la concentración, probable debido a la alta conductividad eléctrica registrada en el sustrato, perjudicando el crecimiento y desarrollo del cultivo (Figura 4.15).

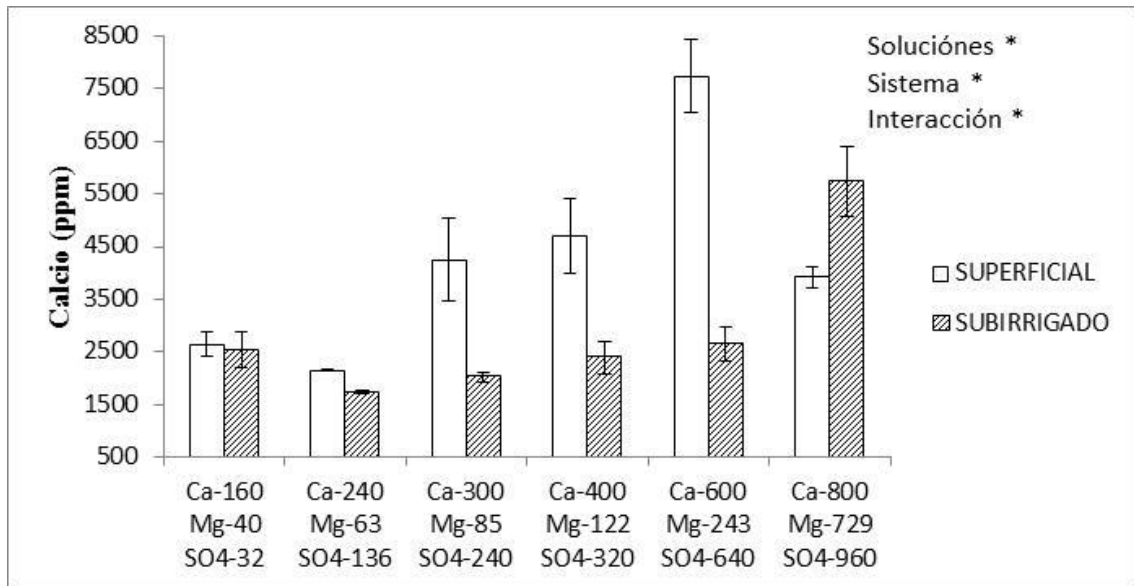


Figura 4.15. Concentración de calcio (Ca) en hojas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.

En la Figura 4.15 se puede observar como las plantas del sistema de riego superficial acumulan más Ca en sus tejidos que las plantas sometidas al sistema de subirrigación a excepción del tratamiento 800-729-960. Los estratos medio e inferior del sustrato en plantas con riego superficial mostraron una mayor CE en comparación con las del sistema de subirrigación, sugiriendo que en estos existe una alta concentración de Ca, Mg y SO_4^{2+} lo que a su vez provoca la alta acumulación de este elemento dentro del tejido vegetal. En contraste, en el sistema de subirrigación, la mayor CE presentó en la parte superior del sustrato, en la cual el crecimiento de raíz es mínimo comparado con el estrato medio e inferior. La solución 800-729-960 aplicada en subirrigación provocó una mayor acumulación de Ca que el sistema de riego superficial, resultados que nos indican que la menor concentración de sales en

los estratos en donde se encuentran la mayor parte de las raíces permitió de cierta forma la acumulación de Ca.

4.16 Análisis mineral para magnesio

La salinidad de las soluciones nutritivas afectó de manera significativa la concentración de Mg en el tejido vegetal; en la Figura 4.16 se puede observar como las plantas de los tratamientos ≥ 600 -243-640 del sistema de riego superficial son las que acumulan mayor cantidad de Mg dentro del tejido, 52 por ciento más que la concentración registrada en los tejidos de las plantas testigo, mientras que las plantas del tratamiento 800-729-960 del sistema de subirrigación acumulan 64 por ciento más que las plantas testigo.

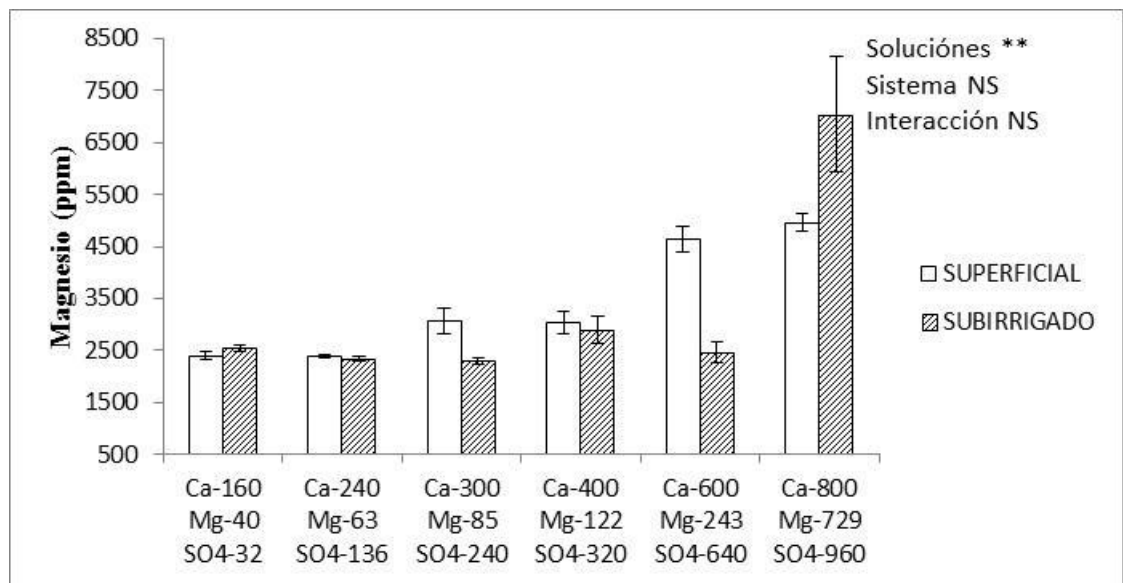


Figura 4.16. Concentración de magnesio (Mg) en hojas de lechuga por efecto de diferentes concentraciones de Ca, Mg y SO_4^{2+} (ppm) en la solución nutritiva bajo dos sistemas de riego.

V. DISCUSIÓN

En el 2013 Nagaz *et al.* mencionan que el agua utilizada en su trabajo para el riego fue de 3.6 dS m^{-1} , CE similar a la solución 400-122-320, con aportaciones del 100, 60 y 30 por ciento de evapotranspiración del cultivo cuando el agua disponible en la zona radicular se agotara, éstos tratamientos dan como resultado una alta salinidad en el medio y un diámetro de la cabeza de lechuga de 33, 26 y 22 cm en el otoño-invierno del 2009-2010, y de 31, 24 y 20 cm en el 2010-2011. El diámetro de la cabeza de lechuga del tratamiento de Nagaz *et al.* donde hay una aportación del 100 por ciento en la evapotranspiración del cultivo es 11 por ciento más grande a la media del tratamiento cinco del sistema de subirrigación de ésta investigación, el cual mostró ser el tratamiento con menor crecimiento en esta etapa del desarrollo del cultivo, y un ocho por ciento superior al tratamiento seis, que es el de mayor concentración de sales en la solución nutritiva, relacionados a la época otoño-invierno 2009-2010.

Bermúdez (2004) trabajó con lechuga en un sistema de subirrigación, donde evaluó cintas de exudación de diferentes diámetros y varias líneas de riego, concluyendo que el desarrollo no fue dependiente del agua aplicada, sin embargo, el tratamiento que mostró un mejor peso a cosecha fue el testigo con riego superficial por goteo. Estos resultados están en contraste con los

obtenidos en la presente investigación, ya que no se detectó efecto del sistema de riego en cuanto al peso fresco de las lechugas. Sin embargo, cuando la CE de la solución nutritiva fue de 2.50, 2.84 y 3.30 dS m⁻¹, las plantas subirrigadas mostraron un peso fresco mayor en siete, nueve y 20 por ciento, respectivamente en comparación con las plantas con riego superficial, permitiendo sugerir que el efecto adverso de una alta CE en la solución nutritiva puede ser contrarrestado cuando se emplean sistemas de subirrigación. Ahmed *et al.* (2000) mencionan que con subirrigación se utiliza 86 por ciento menos agua que el riego por aspersión y que, las plántulas de lechuga subirrigadas fueron más altas, sin embargo, la cabeza de las plantas en el sistema de riego superficial tuvieron más hojas y un peso seco más alto. Lo anterior está en contraste con los resultados del presente estudio, ya que con subirrigación superó al riego superficial en tres de los seis tratamientos aplicados.

Rouphael *et al.* (2006) menciona que el rendimiento de calabacín fue 13 por ciento inferior con la subirrigación que con los sistemas de riego por goteo a una CE en la solución nutritiva de dos dS m⁻¹, y 4.1 dS m⁻¹, la producción de calabacín con subirrigación fue inferior en un 36 por ciento en comparación al riego superficial.

A diferencia del diámetro de planta, tanto las lechugas regadas superficialmente como con subirrigación mostraron un aumento en el peso fresco al elevarse la CE de la solución nutritiva de 2.19 a 2.50 dS m⁻¹, sin embargo, lo más interesante es que la gran diferencia en el diámetro de plantas con riego superficial en comparación con las subirrigadas casi desaparece en

cuanto al peso fresco. Esto sugiere que las lechugas subirrigadas, aunque son más pequeñas resultan con un peso comparable al de las lechugas más grandes obtenidas con riego superficial, y que por lo tanto las lechugas subirrigadas son de una mayor densidad. Lo anterior puede resultar conveniente pues se prefieren que las lechugas sean más crujientes (Vásquez, 2010), lo cual sucedería en lechugas de mayor densidad. A pesar de lo anterior no se detectó una relación entre la densidad con la turgencia de las lechugas.

Lesmes *et al.* (2007) trabajaron sobre lechuga con tratamientos que consisten en una máxima concentración de sales de 60 mM en tres diferentes tipos de sustratos, mencionan que el aumento significativo del peso foliar en los últimos muestreos confirmó lo expuesto por De Pascale y Barbieri (1995) donde la mezcla de sustratos de menor calidad que la turba permitió que la salinidad incrementara el peso específico de las hojas al inducir el incremento de su grosor. En cierto sentido esto se corrobora en el presente estudio, ya que al disminuir el peso fresco en plantas subirrigadas a causa de la alta CE, se observó un aumento en la turgencia de la cabeza.

Han & Lee (2005) mencionan en su investigación con lechuga que la reducción del crecimiento de las plantas es el resultado de la alteración de muchas actividades fisiológicas de la planta, tales como la actividad fotosintética, absorción de minerales y la actividad antioxidante; en su trabajo de investigación la tasa fotosintética y resistencia estomática fueron significativas bajo estrés salino. Lo anterior no pudo ser demostrado en esta

investigación, ya que no fue posible detectar una tendencia en cuanto a la actividad fotosintética.

Sin embargo, si se detectó una disminución en la conductancia y transpiración de la hoja al elevarse la CE de la solución nutritiva en plantas subirrigadas, además de que estas mostraron una mayor conductancia y transpiración que en plantas regadas superficialmente. El que la conductancia y transpiración sea mayor en plantas subirrigadas sugiere que el estado hídrico de estas es mayor, lo que también podría explicar el mayor peso fresco en plantas a pesar de su menor diámetro.

La disminución en conductancia y transpiración en plantas irrigadas con soluciones de mayor CE sugiere que el aumento en la CE está afectando el estado hídrico de las plantas y que la reducción en estos parámetros es un mecanismo para mantener las relaciones hídricas. Se ha reportado en numerosas especies que el aumento de la CE del agua de riego reduce la tasa de transpiración (Andriolo *et al.*, 2005; Romero *et al.*, 2001; Xu *et al.*, 1995; Shannon y Grieve, 1999).

Rouphael *et al.* (2006) trabajando con calabacita zucchini en un sistema de riego superficial y de subirrigación a alta CE, menciona que a la mitad y final de su ensayo las plantas cultivadas con el sistema de subirrigación resultaron en una CE mayor en las partes superior e inferior del sustrato en comparación con el sistema de riego superficial, especialmente a una CE de 4.1 dS m^{-1} , aspecto contrastante con los resultados obtenidos en esta investigación en el

estrato inferior, donde se muestran CE similares al estrato medio, el cual está por debajo del estrato superior que tiene la mayor concentración de sales.

Esto puede ser debido a que en el riego superficial las sales se almacenan mayormente en el estrato inferior, a diferencia del sistema de subirrigación, donde por acción capilar el agua sube, depositando las sales en la parte más seca del sustrato, siendo la parte superior en este caso.

Blessington y Reed (2004) al trabajar con impacientes Nueva Guinea (*Impatiens Hawkeri* Bull), vinca (*Catharanthus roseus* L.) y petunia (*Petunia xhybrida*) resaltan que al utilizar un sistema de subirrigación recirculante, la CE del medio de cultivo se mantuvo por debajo del nivel recomendado de 1.2 dS m^{-1} en la capa inferior y media, sin embargo, en la parte superior del medio de crecimiento, la CE estaba por encima de los niveles recomendados, demostrando así que en el estrato medio e inferior, la CE es más baja que la parte superficial del sustrato. Kent y Reed (1996) al utilizar un sistema de subirrigación en impacientes Nueva Guinea (*Impatiens hawkeri* Bull) y el lirio de la paz (*Spathiphyllum schott*) reafirmaron que la CE se mantuvo baja en las capas media e inferior, mientras que el estrato superior fue de dos a cinco veces mayor que los estratos inferiores.

En el presente estudio, la CE del estrato inferior del sustrato al momento de la cosecha fue mayor en plantas regadas superficialmente en comparación con aquellas subirrigadas, especialmente cuando la CE era de 2.50 dS m^{-1} . Lo anterior se debe a la migración de las sales contenidas en la solución nutritiva,

la cual es principalmente hacia abajo en el perfil del sustrato cuando se emplean sistemas de riego superficial (Reed, 1996). Lo anterior puede explicar porque con esta solución nutritiva en riego superficial permite la obtención de plantas con mayor diámetro y peso fresco.

Richards y Reed (2004) al trabajar con impacientes Nueva Guinea (*Impatiens hawkeri* Bull) mencionan que la CE de los medios de crecimiento fueron mayores en la capa superior a diferencia que el estrato medio e inferior (Whitcher *et al.*, 2005). Por otro lado, Douglas (2001) al trabajar con nochebuena menciona que al analizar las muestras superiores del medio de crecimiento, encontró que la CE fue superior a las muestras inferiores en el sistema de subirrigación. Lo anterior es similar a lo ocurrido en esta investigación, ya que en el sistema de subirrigación el agua sube por capilaridad, acumulando las sales en los extremos del bulbo de humedad, siendo en este caso la parte superior de los contenedores, mientras que el sistema de riego superficial, acumula mayormente las sales en la parte inferior ya que el agua actúa de forma descendente.

Incrocci *et al.* (2006) realizaron un trabajo en tomate cultivado en turba con perlita en un sistema de subirrigación, con una solución nutritiva que contenía 10 mol m^{-3} de NaCl; la solución nutritiva se reemplazaba cuando la CE superaba los seis dS m^{-1} . Los autores mencionan que el movimiento hacia arriba del agua en el sustrato, junto con la absorción selectiva de minerales por las raíces, causa una acumulación salina en la región superior del sustrato, asociado a la acumulación de Na.

Bumgarner *et al.* (2008) utilizando un sistema de subirrigación en la producción de plántulas de (*Quercus rubra* L.) mencionan que este sistema aumentó la CE y disminuyó el pH en la parte superior del sustrato, sin encontrar efecto contrario en el estrato inferior.

Las plantas subirrigadas mostraron una menor concentración foliar de K y Ca cuando se regaron con soluciones de alta CE. Esto puede deberse a un efecto de dilución de los nutrimentos debido a que justamente las plantas con los tratamientos 240-63-136, 300-85-240 y 400-122-320 mostraron un mayor peso fresco.

VI. CONCLUSIONES

Se concluye que la CE aumenta en el estrato superior del sustrato en las plantas con sistema de subirrigación debido a la capilaridad del agua, depositando las sales a este nivel, y disminuyendo la concentración conforme baja el nivel del estrato, aspecto similar el que se presenta en los tratamientos de riego superficial.

Los tratamientos 240-63-136 ppm; 300-85-240 ppm; 400-122-320 ppm aplicados en plantas con sistema de subirrigación, mostraron tener un mayor peso fresco de lechugas por encima de las de riego superficial, demostrando así que se puede tener mayor rendimiento con el sistema de subirrigación a estas concentraciones de sales en el agua de riego.

VII. RESUMEN

La salinidad puede inhibir el crecimiento de las plantas y reducir la productividad a causa de un déficit hídrico, toxicidad por iones y un desbalance nutrimental. Un sistema de subirrigación parte del principio del ascenso capilar del agua hasta la zona radical, reduciendo la lixiviación de nutrimentos en comparación con los sistemas tradicionales de riego. En las zonas áridas del norte de México se presentan con frecuencia altos niveles de calcio (Ca), magnesio (Mg) y sulfato (SO_4^{2+}) en el agua de riego, lo que impacta directamente en la conductividad eléctrica (CE). El presente estudio se planteó con el objetivo de evaluar la factibilidad de obtener lechugas de buena calidad empleando dos tipos de sistemas de riego: superficial y subirrigación, con soluciones nutritivas de alta concentración de Ca, Mg y SO_4^{2+} . El diámetro de las plantas fue mayor en las plantas con riego superficial en comparación con aquellas con subirrigación, sin embargo, las plantas subirrigadas con solución de $3.30 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$ (Ca-400, Mg-122, SO_4^{2+} -320 ppm) mostraron un mayor peso fresco que aquellas con riego superficial, dejando en claro que este sistema es una buena opción para mitigar el efecto por salinidad en lechuga. La tasa de fotosíntesis neta, transpiración y conductancia de la hojas no fueron afectadas por el sistema de riego empleado, pero fueron mayores en plantas subirrigadas que en aquellas con riego superficial. A mayor concentración de Ca-Mg- SO_4^{2+} de la

solución nutritiva se presentó un aumento en la CE de la parte inferior y media del sustrato en el segundo y tercer muestreo, observando que la CE del medio de cultivo fue mayor en plantas que recibieron riego superficial. Al igual que el estrato inferior y medio, la alta concentración de Ca-Mg-SO_4^{2+} de la solución nutritiva afectó de manera significativa la CE del sustrato superior, ya que con subirrigación esta fue mayor en comparación con el de plantas con riego superficial. La alta CE de la solución nutritiva no afectó la concentración de nitrógeno ni de fósforo, pero al elevarse la CE de la solución se incrementó la concentración foliar de potasio y Ca.

Palabras clave: salinidad, nutrición, subirrigación, tolerancia al estrés.

VIII. ABSTRACT

Salinity inhibits growth of plants and reduces plant productivity as it induces water deficit, ion toxicity and nutrient imbalance. Subirrigation systems are designed to use the upward capillary movement of water to reach root zone, which in turns allows reduction in leaching loss of nutrients compared with surface irrigation systems. In the arid zones of northern México, frequently, irrigation water is high in calcium (Ca), magnesium (Mg) and sulphate (SO_4^{2+}) concentration, impacting electrical conductivity (EC). The objective of the present study was to assess the feasibility of producing lettuce of good quality using two irrigation systems: top watering and subirrigation, with nutrient solution of high concentration of Ca, Mg and SO_4^{2+} . Plant diameter was higher in top watered plants; however, subirrigated plants with water of high EC (Ca-400, Mg-122, SO_4^{2+} -320 ppm) resulted of higher fresh mass compared to those of top watered plants at similar EC, indicating that the use of subirrigation systems is an adequate approach to mitigate the deleterious effect of high salinity. Photosynthetic rate, transpiration and leaf conductance were not affected by the irrigation system, but were higher in subirrigated plants. At higher concentration of Ca-Mg- SO_4^{2+} of the nutrient solution, there was an increase in the EC of the bottom portion and middle of the substrate, in the second and third sampling, the EC of this layer was higher when plants were top watered. As for the bottom

layer and middle, the high concentration of Ca-Mg-SO_4^{2+} increased the EC of the middle and top portions of the growing medium; the EC in the top portions of subirrigation are high in comparison at irrigation. High EC of irrigation water did not affect nitrogen or phosphorus leaf concentration; however, increased EC of the nutrient solution was associated with a high leaf potassium and Ca concentration.

Keywords: salinity, nutrition, subirrigation, stress tolerance.

IX. LITERATURA CITADA

- Ahmed, A. K; Cresswell G.C., and Haigh A.M. 2000. Comparison of sub-irrigation and overhead irrigation of tomato and lettuce seedlings. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*. 75:350-354.
- Alcántar, G.G. y Sandoval-Villa, M. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación Especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Almeida D. P. F., Huber D. J., 1999. Apoplastic pH and inorganic ion levels in tomato fruit: a potential means for regulation of cell wall metabolism during ripening. *Physiology Plant* 105: 506-512.
- Andriolo J. L., Luz G. L., Witter M. H., Godoi R. S., Barros G. T., Bortolotto O. C., 2005. Growth and yield of lettuce plants under salinity. *Horticultura Brasileira*, Brasília, 23: 931-934.
- Báez A., 1999. Efecto de la calidad del agua de riego sobre las propiedades del suelo. INTA Rivadavia 1439, Buenos Aires, Argentina.
- Barker A. V., Pilbeam D. J., 2007. *Handbook of Plant Nutrition*. Ed. Taylor & Francis, Boca Raton, Florida, USA.
- Barkla B. J., Vera-Estrella R., Balderas E., Pantoja O., 2007. Mecanismos de tolerancia a la salinidad en plantas. *Biotecnología*, UNAM.
- Barrett-Lennard E. G., 2003. The interaction between waterlogging and salinity in higher plants. Causes, consequences and implications. *Plant Soil* 253: 35-54.
- Bellaloui N., Pilbeam D. J., Reduction of nitrate in leaves of tomato during vegetative growth. *Journal Plant Nutrition* 13: 39-55.
- Bermúdez, C.D. 2004. Respuesta de la lechuga (*Lactuca sativa* L.) variedad Bérnago a la subirrigación en tres disposiciones de líneas de riego bajo invernadero. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, Biblioteca Agropecuaria de Colombia.
- Black C. B., Cowan J. A., 1995 (A). Magnesium-dependent enzymes in general metabolism. In: Cowan J. A., ed. *The Biological Chemistry of Magnesium*. New York: VCH Publishers, Inc., pp: 159-183.

- Black C. B., Cowan J. A., 1995 (B). Magnesium-dependent enzymes in nucleic acid biochemistry. In: Cowan J. A., ed. *The Biological Chemistry of Magnesium*. New York: VCH Publishers, Inc., pp: 137-158.
- Blamey F. P. C., 2003. A role for pectin in the control of cell expansion. *Soil Science Plant Nutrition* 49: 775-783.
- Blessington H., Reed W. 2004. Optimum potassium concentrations in recirculating subirrigation for selected greenhouse crops. *HortScience*, Vol. 39, pp: 1441-1444.
- Britto D. T., Kronzucker H.J., 2003. Ion fluxes and cytosolic pool sizes: examining fundamental relationships in transmembrane flux regulation. *Planta* 217: 490-497.
- Bumgarner M. L., Salifu K. F., Douglass F. J. 2008. Subirrigation of *Quercus rubra* seedlings: Nursery stock quality, media chemistry, and early field performance. *HortScience*, Vol. 43, pp: 2179-2185.
- Bush D. S., 1995. Calcium regulation in plant cells and its role in signaling. *Plant Physiology* 46: 95-122.
- Cartmill A. D., Alarcón A., Valdez-Aguilar L. A., 2007. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance tolerance of *Rosa multiflora* cv. Burr to bicarbonate in irrigation water. *J. Plant Nutr.* 30, 1517-1540.
- Carvajal M., Martínez V., Cerdá A., 1999. Influence of magnesium and salinity on tomato plants grown in hydroponic culture. *Journal Plant Nutrition* 22: 177-190.
- Casas M. F., 1996. Recirculación de soluciones. Riego por subirrigación. *Divulgación. Horticultura*.
- Clarkson D. T., 1984. Calcium transport between tissues and its distribution in the plant. *Plant Cell Environ.* 7: 449-456.
- Cuartero J., Fernández R., 1999. Tomato and salinity. *Scientia Horticulturae* 78. Pp: 83-125. Malaga, Spain.
- De Pascale S., Barbieri G., 1995. Effects of soil salinity from long-term irrigation with saline-sodic water on yield and quality of winter vegetable crops. *Scientia Horticulturae* 64: 145-157.
- Degano C. A. M., 1999. Respuestas morfológicas y anatómicas de *Tessaria absinthioides* (Hook. et Arn.) DC. a la salinidad. *Revta Brasil. Bot.*, Sao Paulo. Pp: 357-363.
- Díaz O. A., Reddy K. R., Moore Jr. P. A., 1994. Solubility of inorganic phosphorus in stream water as influenced by pH and calcium concentration. *Water Research*.

- Dieter P., 1984. Calmodulin and calmodulin-mediated process in plants. *Plant cell environment* 7: 371-380.
- Douglas, A.C. 2001. Growth, nutrient content, and growth medium electrical conductivity of poinsettia irrigated by subirrigation or from overhead. *Journal of Plant Nutrition* 24:523-533.
- Drossopoulos B., Kouchaji G. G., Bouranis D. L., 1996 (A). Seasonal dynamics of mineral nutrients by walnut tree reproductive organs. *Journal Plant Nutrition* 19: 421-434.
- Drossopoulos B., Kouchaji G. G., Bouranis D. L., 1996 (B). Seasonal dynamics of mineral nutrients and carbohydrates by walnut tree leaves. *Journal Plant Nutrition* 19: 493-516.
- Duzgunes N., Papahadjopoulos D., 1983. Ionotropic effects on phospholipids membranes: calcium/magnesium specificity in binding, fluidity, and fusion. In: R. C. Aloia, ed. *Membrane Fluidity in Biology*. New York: Academic Press. Pp: 131-150.
- FAO, 2008. FAO Land and Plant Nutrition Management Service. <http://www.fao.org/ag/agl/agll/spush>
- Fernández G. R., 1990. Algunas experiencias y proposiciones sobre recuperación de suelos con problemas de sales en México. *Terra* 8: 226-240.
- Flowers T. J. & Yeo A. R., 1986. Ion relations of plant under drought and salinity. *Australian Journal of Plant Physiology* 13, pp: 75-91.
- George R., McFarlane D., Nulsen B., 1997. Salinity threatens the viability of agriculture and ecosystems in Western Australia. *Hydrogeology Journal*. Pp: 6-21.
- Ghassemi F., Jakeman A. J., Nix H. A., 1995. *Salinization of Land and Water Resources Human Causes. Extent Management and Case Studies*. CAB International, Wallingford, Oxon, pp: 526.
- Grant C.W., 1983. Lateral phase separation and the cell membrane. In: R. C. Aloia, ed. *Membrane Fluidity in Biology*. New York: Academic Press. Pp: 131-150.
- Grattan S. R. and Grieve C. M., 1999. Salinity – mineral nutrient relations in horticultural crops. *Scientia Hort.* 78: 127-157.
- Grieve C. M., Poss J. A., Grattan S. R., Shouse P. J., Lieth J. H., Zeng L., 2005. Productivity and mineral nutrition of *Limonium* species irrigated with saline wastewaters. *HortScience* 40, pp: 654-658.

- Han, H.S. and Lee, K.D. 2005. Plant growth promoting rhizobacteria effect on antioxidant status, photosynthesis, mineral uptake and growth of lettuce under soil salinity. *Journal of Agriculture and Biological Sciences* 1:210-215.
- Hedge D. M., Irrigation and nitrogen requirement of bell pepper. *Indian Journal Agriculture Science* 58: 668-672.
- Ho L. C., Adams P., 1989. Calcium deficiency-a matter of inadequate transport to rapidly growing organs. *Plants Today* 2: 202-207.
- Horlitz M., Klaff P., 2000. Gene-specific trans-regulatory functions of magnesium for chloroplast mRNA stability in higher plants. *Journal Biol. Chem.* 275: 35638-35645.
- Huang J. & Redmann R. E., 1995. Salt tolerance of *Hordeum* and *Brassica* species during germination and early seedling growth. *Canadian Journal of Plant Science* 75: 815-819.
- Incrocci L., Malorgio F., Della Bartola A., Pardossi A. 2006. The influence of drip irrigation or subirrigation on tomato grown in closed-loop substrate culture with saline water. Dipartimento di Biologia delle Piante Agrarie, Viale delle Piagge. Pisa, Italy. *Scientia Horticulturae*, Vol. 107, pp: 365-372.
- INIFAP, 2001. Problemas de suelos irrigados de las zonas media y altiplano de San Luis Potosí. Folleto no. 11 SAGARPA, SLP.
- Isaev S. 2007. Subirrigasiya // O'zbekiston qishloq xo'jaligi.
- Jacoby B., 1994. Mechanisms involved in salt tolerance of plants. *Handbook of plant and crop stress*. New York, NY. Pp: 97-123.
- Kent M. W., Reed W. 1996. Nitrogen nutrition of New Guinea Impatiens "Barbados" and *Spathiphyllum* "Petite" in a subirrigation system. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, Vol. 121, pp: 816-819.
- Kirkby E. A., Knight A. H., 1977. Influence of the level of nitrate nutrition and ion uptake and assimilation, organic acid accumulation and cation-anion balance of in whole tomato plants. *Plant Physiology* 60: 349-353.
- Kirkby E. A., Pilbeam D. J., 1984. Calcium as a plant nutrient. *Plant Cell Environ.* 7: 397-405.
- Knee M., 1982. Fruit softening III. Requirement for oxygen and pH effects. *J. Exp. Bot.* 33: 1263-1269.
- Kostman T. A., Franceschi V. R., Nakata P. A., 2003. Endoplasmic reticulum sub-compartments are involved in calcium sequestration within raphide crystal idioblasts of *Pistia stratiotes* L. *Plant Science* 165: 205-212.

- Kotuby A. J., Koenig R., Kitchen B., 2000. Salinity and plant tolerance. Utah State University. Cooperative Extension. Pp: 1-2.
- Labuda D., Porschke D., 1982. Magnesium ion inner sphere complex in the anticodon loop of phenylalanine transfer ribonucleic acid. *Biochemistry* 21: 49-53.
- Landis T. D. & Wilkinson K., 2004. Subirrigation; a better option for broad-leaved container nursery crops.
- Legge R. L., Thompson J. E., Baker J. E., Lieberman M., 1982. The effect of calcium on the fluidity of phase properties of microsomal membranes isolated from postclimacteric golden delicious apples. *Plant Cell Physiology* 23: 161-169.
- Lesmes R., Molano A., Miranda D., Chaves B., 2007. Evaluation of salt (NaCl) concentration in irrigation water on lettuce (*Lactuca sativa* L.) "Batavia" growth. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (CORPOICA).
- López R. R., Abreu H., Pérez R. J. M., González H. A., 1992. Riego Localizado. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Madrid, Mundi-Prensa.
- Marmé D., 1983. Calcium transport and function. *Inorganic Plant Nutrition*. Berlin: Springer, pp: 599-625.
- Marschner H., 1995. Mineral nutrition of higher plants, 2nd ed. Academic, San Diego, California.
- Matsuda H., 1991. Magnesium gating of the inwardly rectifying K⁺ channel. *Annu. Rev. Physiol.* 53: 289-298.
- Monge E., Val J., Sanz M., Blanco A., Montañés L., 1994. El calcio nutriente para las plantas. Bitter pit en manzano. Departamento de nutrición vegetal y departamento de pomología, Estación experimental de Aula Dei, Zaragoza.
- Mozafar A., 1997. Distribution of nutrient elements along the maize leaf: alteration by iron deficiency. *Journal Plant Nutrition* 20: 999-1005.
- Munns R. & Passioura J. B., 1984. Effect of prolonged exposure to NaCl on the osmotic pressure of leaf xylem sap from intact, transpiring barley plants. *Australian Journal of Plant Physiology* 11, pp: 497-507.
- Munns R. & Termaat A., 1986. Whole plant responses to salinity. *Australian Journal of Plant Physiology* 13, pp: 143-160.
- Munns R., 2002. Comparative Physiology of salt and water stress. *Plant Cell and Environment* 25, pp: 239-250. Australia.

- Munns R., Tester M., 2008. Mechanisms of salinity tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.* 2008. 59: 651-681.
- Nagaz, K.; El Mokh, F., Moncef, M.M., and Ben, M.N. 2013. Soil salinity, yield and water productivity of lettuce under irrigation regimes with saline water in arid conditions of Tunisia. *International Journal of Agronomy and Plant Production* 4:892-900.
- Nakata P. A., 2003. Advances in our understanding of calcium oxalate crystal formation and function in plants. *Plant Science* 164: 901-909.
- National Land and Water Resources Audit; 2011. <http://audit.ea.gov.au>
- Nenova V., Stoyanov I., 1999. Physiological and biochemical changes in young maize plants under iron deficiency. 3. Concentration and distribution of some nutrient elements. *Journal Plant Nutrition* 22: 565-578.
- Ochiai E. I., 1987. Structural functions. In: E. Frieden, ed. *General Principles of Biochemistry of the Elements*. New York: Plenum Press. Pp: 197-212.
- Osorio U. A., Céspedes R. R., 2000. Effect of micro-irrigation methods on the salinity of the soil profile in a grape vineyard. I. Electrical conductivity of sodium, chloride and boron at several points of the profile. *Agriculture Técnica*.
- Porta J., López-Acevedo M., Roquero C., 1994. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid.
- Rao I. M., Sharp R. E., Boyer J. S., 1987. Leaf magnesium alters photosynthetic response to low water potentials in sunflower. *Plant Physiology* 84: 1214-1219.
- Reed D. Wm. 1996. *A grower's guide to water, media, and nutrition for greenhouse crops*. Batavia, Illinois, USA.
- Reed D. Wm., Todd M. N., 1998. Characterizing salinity limits of New Guinea impatiens in recirculating subirrigation. *Journal of the American society for Horticultural Science* 123: 156-160.
- Renny B., Arteaga A., Florentino A., Amaya G., 2003. Evaluation of subirrigation and sprinkling systems in soils cultivated with palm oil. *Revista UDO Agrícola*.
- Rensing L., Cornelius G., 1980. Biological membranes as components of oscillating systems. *Biol. Rundschau* 18: 197-209.
- Richards L. A., 1980. *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. LIMUSA. México, D. F.

- Richards L., Reed W. 2004. New Guinea Impatiens growth response and nutrient release from controlled-release fertilizer in a recirculating subirrigation and top-water system. *HortScience*, vol. 39, pp: 280-286.
- Romero A. R., Soria T., Cuartero J., 2001. Tomato plant-water uptake and plant-water relationships under saline growth conditions. *Plant Science* 160: 265-272.
- Rouphael, Y.; Cardarelli, M., Rea, E., Battistelli, A. and Colla, G. 2006. Comparison of the subirrigation and drip-irrigation for greenhouse zucchini squash production using saline and non-saline nutrient solutions. *Agricultural Water Management*. 82:99-117.
- Rudd J. J., Tong V. E., 2001. Unravelling response-specificity in Ca^{2+} signaling pathways in plant cells. *New Phytology* 151: 7-34.
- Salisbury F. B. & Ross C. W., 2000. *Fisiología de las plantas. Desarrollo de las plantas y fisiología ambiental*. Editorial Paraninfo, Madrid.
- Santamaría P., Campanile G., Parente A., Elia A., 2003. Subirrigation vs drip-irrigation: Effects on yield and quality of soilless grown cherry tomato. *Journal of horticultural science & biotechnology*. Pp: 290-296.
- Sanders D., Pelloux J., Brownlee C., Harper J. F., 2002. Calcium at the crossroads of signaling. *Plant Cell*14: 401-417.
- Sarabia M. I. F., Cisneros A. R., Aceves de A. J., Durán G. H. M., Castro L. J., 2009. Calidad del agua de riego en suelos agrícolas y cultivos del valle de San Luis Potosí, México. *Revista internacional de contaminación ambiental*.
- Satti S. M. E., Al-Yhyai R. A., Al-Said F., 1996. Fruit quality and partitioning of mineral elements in processing tomato in response to saline nutrients. *Journal Plant nutrition* 19: 705-715.
- Schimmel P., Redfield A., 1980. Transfer RNA in solution: selected topics. *Annu Rev. Biophys. Bioeng.* 9: 181-221.
- Schmal J. L., Dumroese R. K., Davis A. S., Pinto J. R., Jacobs D. F., 2011. Subirrigation for production of native plants in nurseries-concepts, current knowledge, and implementation. *Native Plants Journal*.
- Serrato S. R., Ortiz A. A., Dimas L. J., Berúmen P. S., 2000. Aplicación de lavado y estiércol para recuperar suelos salinos en la comarca Lagunera, México. *Terra* 20: 329-336.
- Shannon M. C., Grieve C. M., 1999. Tolerance of vegetable crops to salinity. *Scientia Horticulturae*, 78: 5-38.

- Shuhrat O. M., 2011. Scientific basis of subirrigation as a factor of increasing the efficiency of using the underground and ground water in arid zones. *Nature and Science*.
- Snedden W. A., Fromm F., Calmodulin as a versatile calcium signal transducer in plants. *New Phytology* 151: 35-66.
- Sonneveld C., Voogt W., 1991. Effects of Ca-stress on blossom-end rot and Mg-deficiency in rockwool grown tomato. *Acta Horticulturae* 294: 81-88.
- Szaclocs I., 1994. Soils and salinization. In *Handbook of plant and crop stress* (ed. M. Pessarakali). Pp: 3-11. Marcel Dekker, New York.
- Teeter M. M., Quigley G. J., Rich A., 1980. In: T. G. Spiro, ed. *Nucleic Acid-Metal Ion Interactions*. New York: Wiley.
- Umali D. L., 1993. Irrigation induced salinity technical. World Bank. Washington, DC. Paper no. 215. Pp: 3-25.
- USDA-ARS. 2008. Research Databases. Bibliography on salt tolerance. George E. Brown, Jr. salinity Lab. US Dep. Agric. Res. Serv., Riverside, California. <http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=8908>
- Vásquez Forttes F., 2010. Lechuga de 4^a gama enriquecida en calcio. Evaluación de algunos parámetros de calidad. Universidad Politécnica de Valencia.
- Vermeiren L., Jobling G. A., 1986. Riego localizado. FAO. Roma, Italia. Serie Riego y Drenaje 36: 203.
- Virk S. S., Cleland R. E., 1988. Calcium and mechanical properties of soybean hypocotyl cell walls: possible role of calcium and protons in cell wall loosening. *Planta* 176: 60-67.
- Walworth J. L., Ceccotti S., 1990. A re-examination of optimum foliar magnesium levels in corn. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 21: 1457-1473.
- Whitcher C. L., Kent M. W., Reed D. W. 2005. Phosphorus concentration affects New Guinea Impatiens and Vinca in recirculating subirrigation. *HortScience*, Vol. 40, pp: 2047-2051.
- White P. J., 2000. Calcium channels in higher plants. *Biochimica et Biophysica Acta* 1465: 171-189.
- White P. J. & Broadley M. R., 2003. Calcium un plants. *Horticulture Research International. Annals of Botany* 92: 487-511.
- White R. E., Hartzell H. C., 1989. Magnesium ions in cardiac function: regulator of ion channels and second messengers. *Biochemistry Pharmacology* 38: 859-867.

- Willats W. G. T., McCartney L., Mackie L., Knox J.P., 2001. Pectin: cell biology and prospects for functional analysis. *Plant Molecular Biology* 47: 9-27.
- Xu H. L., Gauthier L., Gosselin A., 1995. Stomatal and cuticular transpiration of greenhouse tomato plants in response to high solution electrical conductivity and low soil water content. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 120: 417-422.