

# EFFECTO DE LA SALINIDAD EN EL CRECIMIENTO Y ABSORCIÓN NUTRIMENTAL DE PLANTAS MICROPROPAGADAS DE NOPAL (*Opuntia* spp).

N. Calderón-Paniagua<sup>1</sup>; A. A. Estrada-Luna<sup>2</sup>; J. de J. Martínez-Hernández.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ingeniero Forestal con Orientación en Silvicultura - SEMARNAT

<sup>2</sup>Investigador del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Instituto Politécnico Nacional. Unidad Irapuato. Km. 9.6 Libramiento Norte Carr. Irapuato-León. Apartado Postal 629. Irapuato, Gto., C.P. 36500. México. Tel. 462-6239634. e-mail: aestradaluna@yahoo.com ó aestrada@ira.cinvestav.mx

<sup>3</sup>Profesor Investigador Adjunto del Campus San Luis Potosí, Colegio de Postgraduados. Iturbide # 73. Salinas de Hidalgo, S.L.P. C.P. 78600. México. Tel. 496-9630240.

## RESUMEN

En un sistema hidropónico semiautomático se trasplantaron y crecieron bajo condiciones de invernadero, plantas micropropagadas de nopal (*Opuntia* spp.) de tres cultivares identificados como productores de fruta (*O. amyclaea* Tenore), verdura (*O. ficus-indica* Miller (L.)) y forraje (*O. ficus-indica* Miller (L.)). Durante su cultivo se establecieron gradualmente diferentes niveles de salinidad [2, 7, 12, y 17 milisiemens (mS)], con el propósito de evaluar su efecto en la dinámica de crecimiento y en lo nutrimental. Se realizaron muestreos a los 44, 107, 169, y 209 días después del trasplante para cuantificar la producción de materia fresca y seca de las plantas (PMF y PMS, respectivamente), y la extracción nutrimental de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), y magnesio (Mg) en la fracción aérea de las plantas.

Los resultados experimentales indicaron una respuesta diferencial en términos de PMS y PMF para los cultivos. Consistentemente el cultivar para forraje mostró los promedios más altos para estas variables (PMF= 255.52 g, PMS= 10.59 g), mientras que el nopal para fruta los valores más bajos (PMF= 148.60 g, PMS= 6.08 g). Independientemente del cultivar, el uso de la solución nutritiva con un nivel de salinidad de 2 mS registró los mayores valores de PMS (13.77 g), PMF (338.55 g) y extracción de nutrimentos por las plantas (N= 35.4 mg, P= 95.8mg, K= 2914.3 mg, Ca= 117.3 mg, y Mg= 233.9 mg), durante y al final del experimento, observándose un abatimiento en los valores de las variables al incrementarse la salinidad de la solución. Tal comportamiento se asoció básicamente a un desbalance entre cationes y aniones a nivel de solución nutritiva. A pesar de que la temperatura no fue un factor en estudio, se observó un claro efecto de ésta sobre el crecimiento de las plantas.

**PALABRAS CLAVE:** hidroponía, fertigación, *O. amyclaea* T., *O. ficus-indica* M. (L.)

## EFFECTS OF SALINITY ON GROWTH AND NUTRIENT UPTAKE OF MICROPROPAGATED PRICKLY-PEAR CACTUS (*Opuntia* spp) PLANTLETS.

### SUMMARY

Micropropagated prickly-pear cactus (*Opuntia* spp.) plantlets from three cultivars identified to produce fruits (*O. amyclaea* Tenore), vegetable (*O. ficus-indica* Miller (L.)), and forage (*O. ficus-indica* Miller (L.)) were transplanted from tissue culture containers to pots and transferred to greenhouse conditions to be grown in a semi-automatic hydroponic system. During the time of culture, four salinity levels (2, 7 12, and 17 milisiemens, mS) were set up to evaluate their effect on the kinetics of growth and nutrient uptake of the plantlets. Fresh and dry matter production (PMF and PMS, respectively), were determined from each treatment in whole plantlet samples and mineral uptake (N, P, K, Ca, and Mg), from the aerial portion at 44, 107, 169, and 209 days after transplanting.

Plant mass production (PMF and PMS) varied according to the type of cultivar. Consistently, the forage cultivar had the highest averages for both variables (PMF= 255.52 g and PMS= 10.59 g), while the vegetable cultivar the lowest (PMF= 148.60 g and PMS= 6.08 g). Independently to the cultivar type, the use of a nutrient solution with a salinity level of 2 mS produced the highest values of PMS (13.77 g), PMF (338.55 g), and nutrient extraction (N=35.4 mg, P=95.8 mg, K=2914.3 mg, Ca=117.3 mg, and Mg=233.9 mg) by the plantlets. When the salinity level was increased to 7, 12, and 17 mS all variables measured were drastically reduced. These observations are associated with a desbalance among cations and anions in the solution. Despite temperature was not considered a factor under investigation, we observed its great influence on plant growth.

**Key words:** *hidropony, fertigation, O. amyclaea T., O. ficus-indica (M.) L.*

## INTRODUCCIÓN

El nopal (*Opuntia* spp.) es una especie vegetal de importancia en el contexto internacional. En varios países del mundo los productos obtenidos de su cultivo e industrialización, tales como fruta fresca, verdura, forraje, mermeladas, jugos y pulpa, vino, dulces, vinagre, aceites y el colorante acetocarmín son altamente apreciados, por lo que se ha aumentado significativamente la demanda (Brown, 1974; Nerd *et al.*, 1989; Pimienta, 1990, 1994; Sáenz-Hernández, 1995). Debido a lo anterior y gracias a su especializada morfología y fisiología -metabolismo ácido crasicaule- que le confieren la capacidad para colonizar, adaptarse y establecerse en diversos ambientes (Cushman, 2001), se ha logrado con éxito un incremento sustancial en el establecimiento de nuevas áreas de cultivo a lo largo de los cinco continentes (Barbera, 1995).

Numerosos esfuerzos se han llevado a cabo para domesticar y explotar comercialmente al nopal. En los últimos años se han desarrollado diversas investigaciones con el propósito de estudiar los factores que regulan el crecimiento, desarrollo y rendimiento, así como el potencial de respuesta de esta especie vegetal (Nobel y Hartsock, 1984; Barcikowski y Nobel, 1984; Gibson y Nobel, 1986; Nobel, 1988; Nerd *et al.*, 1991b). Entre estos factores, la nutrición alcanza especial significado porque actúa en forma directa sobre la actividad metabólica de las plantas y resulta ser de gran importancia en las respuestas observadas, por lo que los estudios más recientes han sido enfocados a profundizar en estos aspectos (Nobel, 1983; Berry y Nobel, 1985; Nerd *et al.*, 1989; López *et al.*, 1989; Lara, 1990; Nerd *et al.*, 1991a; Mondragón, 1994; Estrada-Luna y Davies, 2001). Como resultado de ello, se ha encontrado que el nopal posee la base genética para producir respuestas favorables a la aplicación de fertilizantes (químicos y orgánicos). Bajo condiciones de cultivo en campo ha sido posible establecer prácticas de fertilización que han ayudado a incrementar sustancialmente el crecimiento, rendimiento y calidad de fruta y verdura por unidad de superficie, así como la aceleración en el proceso de maduración de los frutos (Rebolledo, 1985; Méndez, 1988; Pimienta y Mondragón, 1988; Nerd *et al.*, 1993; Mondragón, 1994).

Estudios básicos indican que las necesidades de nutrimentos en el nopal varían dependiendo de la edad y el órgano de la planta, el estado de desarrollo y el objetivo de la producción. En tallos jóvenes de dos semanas de brotados los contenidos de N, K, y Mg fueron superiores a los registrados en cladodios de 2 años, donde el Na, Fe y Ca tuvieron mayor concentración (Nobel, 1983). De la misma manera, se encontraron diferencias significativas

entre la composición química de los tejidos del clorénquima y parénquima. Se reporta en la literatura que en plantas adultas de cultivares para tuna, los contenidos de N, P, K, Mg, Mn y Zn son más bajos en las raíces que en los cladodios, con excepción del Na y Fe donde las concentraciones son más altas (López *et al.*, 1989).

En la bibliografía existe información experimental muy limitada acerca de aspectos tan fundamentales como la demanda nutrimental a través de las diferentes etapas fenológicas del cultivo, así como del efecto producido en la relación salinidad-fertilidad del suelo sobre la fisiología del nopal. Estudios tendientes a profundizar en el conocimiento de estos aspectos permitirían por un lado optimizar el potencial productivo de la especie, mejorar la calidad de los productos (tunas y cladodios) y lograr un incremento sostenido en los rendimientos, especialmente en aquellas regiones con posibilidades para el establecimiento de plantaciones bajo condiciones de riego y por otro, conocer los posibles daños causados por la toxicidad de iones específicos y desbalances nutrimentales producidos por el efecto osmótico negativo cuando se crean condiciones de salinidad.

Por lo antes mencionado se llevó a cabo el presente trabajo en el que se establecieron como objetivos 1) evaluar el crecimiento de las plantas de tres cultivares de nopal bajo diferentes condiciones de salinidad en un sistema hidropónico de cultivo, 2) determinar la demanda nutrimental de las plantas en función del tiempo, y 3) determinar el efecto de gradientes de salinidad sobre la demanda nutrimental de las plantas.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Plantas de nopal (*Opuntia* spp.) de los cultivares «reina» (*O. amyclaea* Tenore), «pelón» (*O. ficus-indica* Miller (L.)) y «milpa alta» (*O. ficus-indica* Miller (L.)) productores de fruta, forraje y verdura, respectivamente, fueron propagados asexualmente mediante la técnica de cultivo de tejidos vegetales (Estrada-Luna, 1988).

Al término de la etapa de micropropagación, las raíces de las plantas fueron lavadas con agua corriente para eliminar los excesos de agar e inmergidas en una solución de Ridomil (5 g·l<sup>-1</sup>) durante 15 minutos para la prevención del ataque de enfermedades. Después, las plantas fueron transferidas manualmente a macetas de PVC (30 X 12 cm). Como sustrato se usó tezontle con una granulometría uniformizada a un diámetro de 2 - 4 mm. El sustrato fue previamente desinfectado con una solución de hipoclorito de sodio al 0.2 % v/v durante 24 h. Después del transplante, por un lapso de 15 días, las macetas fueron cubiertas individualmente con bolsas de plástico para evitar la deshidratación y favorecer la aclimatación de plantas.

El cultivo se desarrolló en condiciones de invernadero en las instalaciones del *Campus* San Luis Potosí del Colegio de Postgraduados, ubicadas en Salinas de Hidalgo, S.L.P. en un sistema hidropónico con recirculación de la solución, en el que se controló automáticamente la intensidad (60 segundos) y periodicidad del riego (2 horas).

Durante los primeros 15 días después del trasplante, las plantas fueron regadas con agua destilada, luego se utilizó una solución nutritiva balanceada compuesta por N (150 mg·l<sup>-1</sup>), P (40 mg·l<sup>-1</sup>), K (225 mg·l<sup>-1</sup>), Ca (210 mg·l<sup>-1</sup>), Mg (40 mg·l<sup>-1</sup>), Fe (12 mg·l<sup>-1</sup>), Mn (2 mg·l<sup>-1</sup>), B (0.6 mg·l<sup>-1</sup>), Cu (0.1 mg·l<sup>-1</sup>), Zn (0.2 mg·l<sup>-1</sup>), Mo (0.05 mg·l<sup>-1</sup>), la cual fue ajustada a una conductividad eléctrica de 2 milisiemens (mS). Diariamente se ajustó el pH a un valor de 5.8, usando para el caso ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) e hidróxido de amonio (NH<sub>4</sub>OH). A partir de la quinta semana, se establecieron los tratamientos de salinidad (2, 7, 12, y 17 mS), elevando gradualmente la conductividad eléctrica de la solución, de tal manera que aquellos niveles altos tuvieron que pasar primero por el de 2 mS, que fue el mas bajo, después por el de 7 y 12 mS para finalmente ajustarse a 17 mS. Para incrementar la conductividad eléctrica de la solución nutritiva se agregó Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> y KNO<sub>3</sub> cada una al 10 %, en una relación de 1:1. Con este particular manejo de la solución nutritiva, la salinidad básicamente alteró la disponibilidad de nutrimentos para la planta (Cuadro 1), y no fue considerada como un factor de "stress" osmótico.

**CUADRO 1. Valores promedio esperados de macronutrimentos (meq·l<sup>-1</sup>) en la solución nutritiva al variar el nivel de salinidad [conductividad eléctrica (C.E.)].**

C.E. (Ms)	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
2	5.1	5.3	2.1	14.3	1.3	3.2
7	29.5	12.5	2.1	53.6	1.3	3.2
12	57.5	23.1	2.1	78.6	1.3	3.2
17	107.7	31.3	2.1	142.9	1.3	3.2

El experimento fue un factorial completo en el que se estudiaron 4 niveles de salinidad (2, 7, 12 y 17 mS) y 3 cultivares de nopal (fruta, verdura y forrajero). Se utilizó un diseño completamente al azar y un arreglo en parcelas divididas, considerando como parcela grande el nivel de salinidad y como parcela chica el cultivar. Se tuvieron tres repeticiones por tratamiento y cada una de ellas representada por cuatro plantas como unidad experimental.

Durante el experimento se realizaron muestreos a los 44, 107, 169, y 209 días después del trasplante para evaluar la producción de materia fresca (PMF) y seca (PMS) de

las plantas. Además, se realizó análisis nutrimental de la parte aérea del tejido vegetal para determinar N, P, K, Ca, y Mg, los cuales se llevaron a cabo en el Laboratorio de Análisis de Suelo y Agua del *Campus* San Luis Potosí del Colegio de Postgraduados. Se utilizaron los métodos de espectrofotometría de absorción atómica para las determinaciones de K, Ca, y Mg, el de Microkjendahl modificado para vegetales en el caso de N (Etchevers, 1988) y el de colorimetría para P (Olsen *et al.*, 1954). Con los promedios obtenidos de los datos se generaron cuadros del grado de abastecimiento nutrimental y extracción mineral de las plantas. El procesamiento de la información se realizó mediante análisis de varianza y comparación de medias, usando la prueba múltiple de Tukey (DSH), a una significancia del 0.05 % de probabilidad (SAS Institute Inc., 1996).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de varianza practicado a los datos obtenidos al final del experimento demostró que hubo una respuesta diferencial entre los cultivares de nopal para las variables de producción de materia (fresca y seca) y extracción nutrimental a los gradientes de salinidad y su interacción.

Los cultivares tuvieron diferentes velocidades de crecimiento, lo cual dio como resultado diferencias significativas en las tasas de extracción nutrimental (Cuadro 2). Tal comportamiento se atribuyó al efecto de la expresión del carácter genotípico de cada cultivar (Marschner, 1995); lo cual explica que el nopal forrajero haya alcanzado valores que fueron significativamente superiores a los observados en los cultivares de fruta y verdura. Esto es un indicador de que este cultivar mostró una mayor demanda nutrimental durante el crecimiento y por consiguiente una mayor capacidad generativa de yemas vegetativas.

La evaluación de las variables durante distintas etapas de desarrollo de las plantas permitió cuantificar básicamente dos etapas de crecimiento: una de frío (segundo y tercer muestreo) y otra de calor (tercer y cuarto muestreo). Con ello se detectó claramente las diferencias entre cultivares; es decir, pudieron no existir diferencias en las variables al final de la evaluación, pero sí durante el crecimiento del cultivo. Lo anterior se ejemplifica con el cálculo de las tasas diarias de producción de materia fresca y seca, y de extracción nutrimental para cada uno de los cultivares (Cuadro 3) en donde se observa una marcada diferencia entre los datos obtenidos durante el periodo de crecimiento en invierno (107 a 169 días después del trasplante), con respecto a los de primavera (169 a 209 días después del trasplante).

**CUADRO 2. Producción de materia fresca (PMF), seca (PMS) [g-planta<sup>-1</sup>] y extracción nutrimental promedio [mg-planta<sup>-1</sup>] de los cultivares de nopal (*Opuntia* spp.) a los 209 días después del trasplante.**

Cultivar	PMF	PMS	N	P	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
Forrajero	255.52 a	10.60a	27.5 <sup>a</sup>	93.2a	2432.4a	135.2a	137.5a
Verdura	193.08 b	8.01b	21.4ab	53.4ab	1737.5b	49.9b	84.8b
Fruta	148.60b	6.08b	16.9b	25.6b	1324.5b	26.2b	76.9b
DHS	45.26	2.02	9.8	56.4	472.5	46.2	31.5

<sup>a</sup>valores con la misma letra son estadísticamente iguales al 95 % de probabilidad.

Las tasas de producción de materia fresca y seca y extracción nutrimental calculadas en los tres cultivares durante el periodo de frío (107 a 169 DDT), fueron bajas y estuvieron asociadas con una drástica reducción de las temperaturas durante el cultivo, las cuales oscilaron entre 5 y 13 °C. En este caso, el cultivar forrajero resultó ser el más tolerante a estas temperaturas, ya que aunque a niveles bajos, sostuvo activo su crecimiento y la diferenciación de yemas vegetativas, lo cual no sucedió en las plantas de nopal para verdura y fruta que aparentemente entraron en una etapa de letargo vegetativo.

Después de transcurrido el periodo invernal (169 a 209 DDT), el crecimiento en todos los cultivares tuvo una reactivación acelerada como consecuencia del aumento de temperatura, lo que significó que las tasas de acumulación relativa de materia (seca y fresca) calculadas después de este periodo fueran las más altas registradas en la conducción del experimento (Cuadro 3). La respuesta anterior coincide con lo establecido por Levitt (1972) y Mengel y Kirkby (1987), quienes mencionan que los requerimientos durante el crecimiento vegetativo está fuertemente asociado con las temperaturas en el ambiente en el que se desarrolla la planta.

Respecto a los gradientes de salinidad se encontró que con la solución nutritiva a una conductividad eléctrica de 2 mS las plantas de nopal de los tres cultivares lograron un mayor rendimiento de materia vegetal (fresca y seca). La extracción nutrimental manifestó un similar comportamiento, lo que sugiere que el abastecimiento de nutrientes proporcionado mediante esta solución nutritiva resultó eficiente para cubrir la demanda de las plantas durante el periodo de crecimiento y desarrollo que comprendió el experimento (Cuadro 4).

Con relación al efecto de la salinidad sobre el crecimiento de las plantas, cabe recordar que el establecimiento de los diferentes niveles (2, 7, 12, y 17 mS) se logró mediante la adición de sales de nitrato de potasio (KNO<sub>3</sub>) y nitrato de calcio (Ca (NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>), las cuales

por consiguiente incrementaron las cantidades disponibles de N, K<sup>+</sup>, y Ca<sup>2+</sup> en las soluciones (Cuadro 1). Esto permitió suponer que las concentraciones de nutrientes bajo los gradientes de salinidad superiores a 2 mS, no limitarían el crecimiento de las plantas. Por lo tanto, era de esperarse un incremento en la producción de materia seca, así como también en las cantidades de nutrientes extraídos, en particular de N, K<sup>+</sup> y Ca<sup>2+</sup>. Sin embargo, consistentemente se observó un abatimiento en los valores promedio de las variables (PMS, PMF, y extracción nutrimental) al incrementarse los gradientes de salinidad en la solución nutritiva. Esto significó que las altas concentraciones de K<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, y N generadas para alcanzar los diferentes niveles de salinidad en la solución nutritiva, provocaron un desorden nutrimental en la planta y por consecuencia un desbalance de iones, el cual pudo haber promovido un efecto de antagonismo iónico. Esto está acorde con lo señalado por Feigin (1985) y Mengel y Kirkby (1987) quienes mencionan que la salinidad se desarrolla cuando las concentraciones de Na<sup>+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y B en la solución del suelo son altas.

**CUADRO 3. Tasas diarias de producción de materia fresca (TPMF), seca (TPMS) y extracción nutrimental (TE) [mg-planta<sup>-1</sup>] de los cultivares de nopal (*Opuntia* spp.) durante el experimento.**

Variables	Periodo de Muestreo					
	(107 – 169 DDT)			(169 – 209 DDT)		
	Forraje	Verdura	Fruta	Forraje	Verdura	Fruta
TPMF	990.70	721.60	448.60	4195.90	3288.80	2600.80
TPMS	46.60	35.90	22.40	164.90	127.40	95.40
TENitrógeno	0.16	0.15	0.08	0.38	0.28	0.24
TEFósforo	0.24	0.40	0.13	1.79	0.62	0.33
TEPotasio	12.44	9.07	6.60	40.11	28.26	22.50
TECalcio	0.09	0.05	0.003	3.10	1.00	0.52
TEMagnesio	0.66	0.55	0.33	2.20	1.20	1.30

**CUADRO 4. Producción de materia fresca (PMF), seca (PMS) [g-planta<sup>-1</sup>] y extracción nutrimental promedio [mg-planta<sup>-1</sup>] de los cultivares de nopal bajo diferentes gradientes de salinidad a los 209 días después del trasplante.**

C.E. (mS)	PMF	PMS	N	P	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
	2	338.55a	13.77a	35.4 <sup>a</sup>	95.8a	2914.3a	117.3a
7	231.80 b	9.02b	23.4ab	82.9ab	2234.1b	111.9b	93.7b
12	143.32c	6.05c	13.3b	33.8ab	1364.7b	29.7b	46.7b
17	82.6d	4.07c	9.6c	17.1b	812.9c	22.8b	24.7c
DHS	57.73	2.57	12.5	71.9	602.8	58.9	40.2

<sup>a</sup>valores con la misma letra son estadísticamente iguales al 95 % de probabilidad.

Con base en la información obtenida en esta investigación puede señalarse que los abatimientos en las tasas de producción de materia seca y fresca son atribuidos a la ocurrencia, a nivel de tejido vegetal, de un efecto de "antagonismo catiónico o aniónico". Estudios realizados por Feigin (1985) muestran que en realidad la presencia simultánea de sales diversas y nutrimentos en la zona radical puede influir la estimulación de efectos sinérgicos o antagónicos entre ellos, produciendo la absorción de ciertos iones por las plantas y afectar su composición química.

En este caso particular, al incrementar las concentraciones de  $K^+$  y  $Ca^{2+}$  en la solución nutritiva y mantener constante la concentración de  $Mg^{2+}$ , se favoreció un desbalance en la relación  $K^+/Ca^{2+}/Mg^{2+}$  en las soluciones con altas conductividades eléctricas, dando como resultado un efecto de antagonismo catiónico. A partir del nivel de 7 mS de salinidad se observó claramente un aumento en la concentración de  $Ca^{2+}$  y  $K^+$  en el tejido vegetal. En los niveles de 12 y 17 mS las concentraciones de  $Ca^{2+}$  y  $Mg^{2+}$  disminuyeron drásticamente, y sólo ligeramente las de  $K^+$ . Esto indicó que el  $K^+$ , a los niveles más altos de conductividad eléctrica actuó como un elemento antagónico, tanto para  $Ca^{2+}$  como para  $Mg^{2+}$ . Por tal razón, se encontraron valores de abatimiento de  $Ca^{2+}$  de 4.6, 74.7 y 80.6 %, mientras que en  $Mg^{2+}$  fueron del orden del 60, 80 y 89.4 % en los gradientes de salinidad de 7, 12 y 17 mS, respectivamente.

Con respecto al posible efecto antagónico de carácter aniónico señalado anteriormente, se observó que las adiciones de nitratos modificaron drásticamente la relación  $NO_3^-/H_2PO_4^-$ , por lo que se redujo la absorción de P en las plantas. Los abatimientos en la extracción de este elemento fueron del orden de 17.1, 64.7, y 82.2 % en las plantas de la especie cultivada en los tratamientos con conductividades eléctricas de 7, 12 y 17 mS, respectivamente.

Los resultados encontrados en este trabajo coinciden con los de otros investigadores que estudian al cultivo de nopal. Baca (1988) en un experimento sobre deficiencias nutrimentales en plantas micropropagadas de nopal encontró que aquellas que no fueron nutridas con P alcanzaron sólo el 4 % del crecimiento logrado por las plantas testigo. Marschner (1995) enfatiza el importante papel que juega el P en el metabolismo de las plantas durante la transferencia de energía; o bien, como parte estructural de compuestos químicos esenciales.

Tomando en consideración el efecto antagónico catiónico-aniónico señalado, se puede aseverar que el abatimiento en la producción de materia vegetal se debió fundamentalmente a una disminución en la absorción de P y  $Mg^{2+}$  por las plantas de los tres cultivares de nopal, principalmente durante la etapa de intenso crecimiento, sinónimo de una fuerte demanda nutrimental. Este comportamiento se hizo evidente entre los gradientes de

salinidad, aunque se manifestó en forma diferencial en los cultivares.

Por otro lado, se observó un efecto de toxicidad de  $K^+$  favorecido por las altas concentraciones de este elemento existentes a nivel de solución nutritiva, y no de nitratos ( $NO_3^-$ ), como podría esperarse (Marschner, 1995). El metabolismo de los nitratos es regulado por el  $K^+$  en las plantas mediante un proceso de balance catión-anión, donde el  $K^+$  tiene una función muy importante, ya que actúa como ión acompañante en el transporte de  $NO_3^-$  hacia la parte aérea de la planta y como activador de la enzima nitrato-reductasa en el proceso de reducción del nitrógeno (Mengel y Kirkby, 1987). En esta investigación el  $K^+$  como nutrimento esencial en el crecimiento de la planta mostró ser determinante en la producción de materia vegetal en todos los cultivares evaluados. Resultó evidente el fenómeno de consumo superfluo, es decir, absorción de  $K^+$  por las plantas debido a las altas concentraciones existentes en la solución nutritiva; sin embargo, no se observó efecto alguno sobre el crecimiento. Cuando el  $K^+$  es proporcionado a la planta en forma abundante, con frecuencia ocurre consumo superfluo, causando una posible interferencia en la absorción y disponibilidad fisiológica de  $Mg^{2+}$  y  $Ca^{2+}$  (Marschner, 1995). De ahí que sea entendible que debido a las altas concentraciones de  $K^+$  a nivel de solución se haya inhibido también la absorción de  $Ca^{2+}$  por la planta.

Por lo anterior, se concluye que las plantas de nopal provenientes del cultivo *in vitro* mostraron una respuesta diferente en términos de rendimiento en materia vegetal al ser cultivadas en una solución nutritiva balanceada bajo un sistema hidropónico semiautomático. Esto estuvo asociado fuertemente con la temperatura prevaleciente en el invernadero y con su genotipo. El uso de la solución nutritiva con un gradiente de salinidad de 2 mS produjo las mejores respuestas en cuanto a la producción de materia vegetal, así como también la mayor extracción de nutrimentos por parte de las plantas en los diferentes cultivares. El incremento del nivel de salinidad en la solución nutritiva afectó en forma negativa la producción de materia vegetal y extracción de nutrimentos en los cultivares. Se produjo un desbalance de iones al incrementar el nivel de salinidad en la solución nutritiva, lo cual propició el consumo superfluo de algunos nutrimentos como el  $K^+$  y el abatimiento en la absorción de otros, como el P y  $Ca^{2+}$ .

## AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al *Campus* San Luis Potosí del Colegio de Postgraduados por el apoyo financiero y logístico para la realización de esta investigación. Los autores agradecen al Ing. Leovardo Contreras-Alvarado, encargado del Laboratorio de Análisis de Suelo y Planta del *Campus* San Luis Potosí del Colegio de Postgraduados, por su ayuda en la realización de los análisis nutrimentales.

## LITERATURA CITADA

- BARBERA, G. (1995). History, economic and agro-ecological importance. En: **Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear**. Eds. G. Barbera, P. Inglese and E. Pimienta-Barrios. FAO, Rome, pp. 1-8.
- BARCIKOWSKI, W.; NOBEL, P.S. 1984. Water relations of cacti during desiccation: distribution of water in tissues. *Botanical Gazette* 145(1): 110-115.
- BROWN, R.F. 1974. Nopal Tunero. *Revista Tierra* 10(29): 528.
- BERRY, W.L.; NOBEL, P.S. 1985. Influence of soil and mineral stresses on cacti. *Journal of Plant Nutrition* 8(8): 679-696.
- CUSHMAN, J.C. 2001. Crassulacean Acid Metabolism. A plastic photosynthetic adaptation to arid environments. *Plant Physiology* 127: 1439-1448.
- ESTRADA L., A. A. 1988. Producción de brotes e injertación *in vitro* de seis especies de nopal (*Opuntia* spp) originarias del Altiplano Potosino-Zacatecano. Tesis Maestría en Ciencias. Centro de Genética, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México. México. 160 p.
- ESTRADA-LUNA, A. A.; DAVIES, F. T. Jr. 2001. Mycorrhizal fungi enhance growth and nutrient uptake of prickly-pear cactus (*Opuntia albicarpa* Scheinvar 'Reyna') plantlets after *ex vitro* transplantation. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology* 76(6): 739-745.
- ETCHEVERS B., J.D. 1988. Análisis químico de suelos y plantas. Notas de clases. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, Edo. de México, México.
- FEIGIN, A. 1985. Fertilization management of crops irrigated with saline water. *Plant and Soil* 89: 285-299.
- GIBSON, A.C.; NOBEL, P.S. 1986. The cactus premier. Harvard University Press. U.S.A. 286 p.
- LARA S., R. 1990. Dinámica nutrimental en nopal tunero (*O. amyclaea* Tenore) con diferentes fuentes de fertilización. Tesis Maestría en Ciencias. Centro de Fruticultura, Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México, México. 70 p.
- LEVITT, J. 1972. Responses of plants to environmental stresses. Academic Press. New York, U.S.A. 697p.
- LÓPEZ M., J. L.; CRUZ H., P.; LÓPEZ J., A. 1989. Contenidos nutrimentales en tallos y raíces de nopal tunero *Opuntia amyclaea* Tenore. *Revista Chapingo* 62-63: 144-148.
- MARSCHNER, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. London, UK. 679 p.
- MÉNDEZ G., S. J. 1988. Respuesta a la fertilización química y orgánica de tres formas de nopal (*Opuntia* spp) en una plantación comercial de Ojo Caliente, Zac. Tesis Profesional. Universidad Autónoma de Zacatecas. Zacatecas, Zac. México. 120 p.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. 1987. Principles of plant nutrition. International Potash Institute. Switzerland. 687 p.
- MONDRAGÓN C., J. 1994. Fertilización del nopal tunero. En: Esparza F., G. y S.J. Méndez G. (eds.). Aportaciones técnicas y experiencias de la producción de tuna en Zacatecas. C.R.E.Z.A.S.-C.P. Salinas de Hidalgo, S.L.P. pp. 41-45.
- NERD, A.; KARADI, A.; MIZRAHI, Y. 1989. Irrigation, fertilization, and polyethylene covers influence the development in prickly pear. *HortScience* 24(5): 773-775.
- NERD, A.; KARADI, A.; MIZRAHI, Y. 1991-a. Out-of-season prickly pear: fruit characteristics and effect of fertilization and short droughts on productivity. *HortScience* 26(5): 527-529.
- NERD, A.; KARADI, A.; MIZRAHI, Y. 1991-b. Salt tolerance of prickly pear cactus (*Opuntia ficus-indica*). *Plant and Soil* 137: 201-207.
- NERD, A.; MESIKA, R.; MIZRAHI, Y. 1993. Effect of N fertilizer on autumn floral flush and cladode N in prickly pear (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.). *Journal of Horticultural Science* 68(3): 337-342.
- NOBEL, P.S. 1983. Nutrient levels in cacti-relation to nocturnal acid accumulation and growth. *The American Journal of Botany* 70(8): 1244-1253.
- NOBEL, P. S.; HARTSOCK, T. L. 1984. Physiological responses of *Opuntia ficus-indica* to growth temperature. *Physiologia Plantarum* 60: 98-105.
- NOBEL, P. S. 1988. Environmental biology of agaves and cacti. Cambridge University Press. U.S.A. 270 p.
- OLSEN, S. R.; COLE C. V.; WATANABE F. S.; DEAN L. A. 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. U.S. Dept. of Agric. Circ. U.S.A. 939 p.
- PIMIENTA B., E. 1990. El nopal tunero. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco. México. 246 p.
- PIMIENTA B., E. 1994. Perspectiva general de la producción de tuna en el mundo. En: Esparza F., G. y S.J. Méndez G. (Eds.). Aportaciones técnicas y experiencias de la producción de tuna en Zacatecas. C.R.E.Z.A.S.-C.P. Salinas de Hidalgo, S.L.P. pp. 25-30.
- PIMIENTA B., E.; MONDRAGÓN J., C. 1988. Efecto de la fertilización química y orgánica en el rendimiento y calidad de frutos en nopal (*Opuntia* sp) tunero. En: Resúmenes del XII Congreso Nacional de la SOMEFI. Chapingo, Edo. de México.
- REBOLLEDO V., J. D. 1985. Estudio comparativo del desarrollo en invernadero de tres especies de nopal (*Opuntia* spp) en diferentes condiciones de suelos. Tesis profesional. Universidad Veracruzana. Xalapa, Ver. México. 131 p.
- SÁENZ-HERNÁNDEZ, C. 1995. Food manufacture and by-product. En: Agro-ecology, cultivation and uses of cactus pear. Eds. G. Barbera, P. Inglese and E. Pimienta-Barrios. FAO, Rome, pp. 137-143.
- SAS INSTITUTE, INC. 1996. The SAS system for windows, release 6.12. Cary, NC, USA.