



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTADES DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA

**PROGRAMA MULTIDISCIPLINARIO DE POSGRADO EN
CIENCIAS AMBIENTALES**

**PRODUCTIVIDAD PRIMARIA Y CALIDAD NUTRIMENTAL DE
NOPAL (*OPUNTIA* SPP. Y *NOPALEA* SP.) EN CONDICIONES
INTENSIVAS**

**TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES**

PRESENTA:

ING. HUGO MAGDALENO RAMÍREZ TOBÍAS

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JUAN ANTONIO REYES AGÜERO

COMITÉ TUTELAR:

DR. JUAN ROGELIO AGUIRRE RIVERA

DR. JUAN MANUEL PINOS RODRÍGUEZ



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ

FACULTADES DE CIENCIAS QUÍMICAS, INGENIERÍA Y MEDICINA

**PROGRAMA MULTIDISCIPLINARIO DE POSGRADO EN
CIENCIAS AMBIENTALES**

**PRODUCTIVIDAD PRIMARIA Y CALIDAD NUTRIMENTAL DE
NOPAL (*OPUNTIA* SPP. Y *NOPALEA* SP.) EN CONDICIONES
INTENSIVAS**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS AMBIENTALES

PRESENTA:

ING. HUGO MAGDALENO RAMÍREZ TOBÍAS

DIRECTOR DE TESIS:

DR. JUAN ANTONIO REYES AGÜERO

SINODALES:

PRESIDENTE:

DR. JUAN ANTONIO REYES AGÜERO

SECRETARIO:

DR. JUAN ROGELIO AGUIRRE RIVERA

VOCAL:

DR. JUAN CARLOS GARCÍA LÓPEZ

SAN LUIS POTOSÍ, S.L.P.

MARZO DE 2006

PROYECTO REALIZADO EN:

**INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE ZONAS DESÉRTICAS DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
SAN LUIS POTOSÍ**

**CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACYT)
BECA-TESIS (CONVENIO No. 181453)**

**LA MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES RECIBE APOYO A TRAVÉS DEL
PROGRAMA DE FORTALECIMIENTO AL POSGRADO NACIONAL (PIFOP - SEP).**

Esta tesis fue dirigida por:

Dr. Juan Antonio Reyes Agüero,

y asesorada por:

Dr. Juan Rogelio Aguirre Rivera y

Dr. Juan Manuel Pinos Rodríguez

Dedicatoria

A Dios, por permitirme concluir una etapa mas en mi vida.

A Erika y Hugo Azael, los amo.

A mis padres y hermanos.

Agradecimientos

A nuestro México y su gente, cuyos recursos hacen posible la existencia de las instituciones que colaboraron en mi formación. El CONACYT otorgó una beca para la realización de estudios de maestría; la Universidad Autónoma de San Luis Potosí a través del Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales y del Instituto de Investigación de Zonas Desérticas dispuso un espacio para la realización de mis estudios de posgrado. El Fondo de Apoyo a la Investigación de la UASLP a través del convenio CO4-FAI-04-37.37 otorgó un financiamiento para iniciar el proyecto de tesis, posteriormente la Comisión Nacional de las Zonas Áridas y la Fundación Produce San Luis Potosí, A.C. financiaron su continuación y culminación.

A los “Luchadores de San José de la Peña” por disponer su infraestructura para la realización de este experimento. En especial a doña Juanita Vallejo, don Epifanio Castillo, Saturnino Castillo y Claudia por abrirme las puertas de su casa durante mis estancias en la comunidad; a don Guadalupe Vázquez y su familia por sus atenciones y apoyo; a Alejandro Vázquez, quien apoyó con precisión y responsabilidad en las mediciones, mantenimiento, muestreo, etc.; a don Catalino González, por sus atenciones, apoyo y sus lecciones de observación; a don Santos Compean, Jesús Vázquez, Exsiquio Vallejo, Daniel Rivera, Francisco Vázquez, Lucio Vallejo, Pablo Vallejo por colaborar en los trabajos de instalación y mantenimiento.

Al personal administrativo del IIZD porque con su trabajo colaboraron en mi formación.

A los integrantes de mi comité de tesis: el Dr. Juan Antonio Reyes Agüero por dirigir este trabajo, por ser un buen maestro, un gran facilitador y un ejemplo de trabajo constante; el Dr. Juan Rogelio Aguirre Rivera por sus ideas y aportaciones durante el desarrollo de esta tesis y el Dr. Juan Manuel Pinos Rodríguez por su disponibilidad y apoyo, sobre todo en los análisis nutrimentales y estadísticos.

Al personal de la biblioteca, en especial a Marilú por su gran apoyo en la disponibilidad del material bibliográfico.

A mis compañeros de la generación 2003 del PMPCA, por todos los momentos que compartimos.

A mis compañeros del área de Recursos Naturales Renovables, Raquel Tovar (†), Memo Espinosa, Gaby Cilia, Christian Michel, Gaby García, Guadalupe Bárcenas, Paco Aguilar, Jorge Flores, Pedro Castillo, Mónica López, Margarita García, Jessica Loza y Fernando Carlín, porque de alguna forma colaboraron en mi formación y en la realización de este trabajo, gracias por su apoyo, compañía y amistad. A Fernando Carlín agradezco enormemente su gran apoyo durante la construcción e instalación del experimento.

A los señores Don José Ventura y Jaime Silva por ayudarme en la extracción y selección de la gravilla de tezontle, fue una tarea difícil y cansada.

A la maestra Yolanda Gallegos por facilitarme los reactivos que contenían algunos micronutrientes.

A la Dra. Bertha I. Juárez por atenderme en algunas dudas y por facilitarme material bibliográfico.

A la Dra. Peña por sus revisiones, comentarios y sugerencias.

Al Dr. Miguel Angel Ruiz, encargado del laboratorio de Ingeniería en Alimentos de la Facultad de Ciencias Químicas de la UASLP por permitirnos realizar en su laboratorio algunos pruebas de calidad del nopalito.

Al Dr. Alejandro Rocha de la Planta Piloto de la Facultad de Ciencias Químicas de la UASLP, por apoyar a este proyecto en la realización de pruebas mecánicas de calidad del nopalito.

A los estudiantes de la carrera de Ing. Agroindustrial, Cristian López, Nancy Quistian y Fátima Rangel por su gran apoyo en los trabajos de muestreo y análisis de laboratorio.

Al Ing. Francisco González C., por su apoyo como técnico comunitario.

Al Sr. Hugo Martínez por permitirme conocer sus instalaciones e internarme en el mundo de la hidroponía.

Al Ing. J.L.A. Delgado del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad de Guanajuato por contactarme con los productores de Valtierrilla, Guanajuato.

A los propietarios de los huertos de nopal de San Luis Potosí y Valtierrilla, Guanajuato, que donaron los cladodios de los cultivares Tamazunchale y Valtierrilla.

A los que involuntariamente omití.

Índice general

Índice de cuadros	iii
Índice de figuras	iv
Resumen general	1
Introducción general	2
Literatura citada	4
I Características nutrimentales de cladodios de <i>Opuntia</i> spp. y <i>Nopalea</i> sp. producidos en hidroponía	7
Resumen	8
Introducción	9
Materiales y métodos	10
Material biológico	12
Análisis de muestras	12
Diseño experimental y análisis estadístico	13
Resultados y discusión	14
Materia seca	14
Proteína cruda	20
Fibra insoluble en detergente neutro y en detergente ácido	22
Cenizas	28
Conclusiones	31
Literatura citada	32
II Productividad de <i>Opuntia</i> spp. y <i>Nopalea</i> sp. en hidroponía y su relación con la temperatura	38
Resumen	39
Introducción	40
Materiales y métodos	41
Composición y manejo de la solución nutritiva	42
Material biológico	43
Plantación	44
Evaluaciones	44
Diseño experimental y análisis estadístico	45

Resultados y discusión.....	46
Efecto del estadio de crecimiento.....	46
Efecto de la especie	48
Efecto de la interacción especie*estadio de crecimiento.....	50
Frecuencia de cosecha	53
Efecto de la temperatura.....	54
Conclusiones.....	56
Literatura citada.....	58
Discusión general	63
Literatura citada.....	66
Conclusiones generales	69

Índice de cuadros

Cuadro 1. Composición de la solución nutritiva y fórmula química de las sustancias utilizadas.....	11
Cuadro 2. Amplitudes de tamaño (cm) de los cuatro estadios de crecimiento de cladodios de <i>Opuntia</i> y <i>Nopalea</i> , producidos en hidroponía.....	12
Cuadro 3. Características nutrimentales de cladodios de <i>Opuntia</i> spp. y <i>Nopalea</i> sp., de cuatro estadios de crecimiento, producidos en hidroponía.....	17
Cuadro 4. Composición de la solución nutritiva y fórmula química de las sustancias utilizadas.....	42
Cuadro 5. Fórmula climática y temperaturas de las regiones de procedencia del material de <i>Opuntia</i> y <i>Nopalea</i> evaluado.....	43
Cuadro 6. Amplitudes de tamaño (cm) de los cuatro estadios de crecimiento de cladodios de <i>Opuntia</i> y <i>Nopalea</i> , producidos en hidroponía.....	45
Cuadro 7. Frecuencia (intervalo medio y número de cosechas) de cosecha según el estadio de crecimiento (EC) al corte, durante el periodo experimental (10 de enero-2 de diciembre de 2005).....	54
Cuadro 8. Correlación entre la productividad de <i>Opuntia</i> spp. y <i>Nopalea</i> sp. y los promedios de temperaturas mínimas, máximas y medias, de los periodos parciales.....	55

Índice de figuras

Figura 1. Contenido de materia seca de cladodios de <i>Opuntia</i> spp. y <i>Nopalea</i> sp., producidos en hidroponía.....	16
Figura 2. Efecto de la madurez en el contenido de materia seca de cladodios de <i>Opuntia</i> spp. y <i>Nopalea</i> sp., producidos en hidroponía.....	18
Figura 3. Contenido de materia seca de cladodios (<i>Opuntia</i> y <i>Nopalea</i>) de cuatro estadios de crecimiento producidos en hidroponía.....	20
Figura 4. Efecto de la madurez en el contenido de proteína de cladodios de <i>Opuntia</i> spp. y <i>Nopalea</i> sp., producidos en hidroponía.....	22
Figura 5. Contenido de fibra insoluble en detergente neutro de cladodios de cuatro especies de nopal, producidos en hidroponía.....	24
Figura 6. Contenido de fibra insoluble en detergente ácido de cladodios de cuatro especies de nopal, producidos en hidroponía.....	25
Figura 7. Efecto de la madurez en el contenido de fibra insoluble en detergente neutro de cladodios de <i>Opuntia</i> spp. y <i>Nopalea</i> sp., producidos en hidroponía.....	26
Figura 8. Efecto de la madurez en el contenido de fibra insoluble en detergente ácido de cladodios de <i>Opuntia</i> spp. y <i>Nopalea</i> sp., producidos en hidroponía.....	27
Figura 9. Efecto de la madurez en el contenido de cenizas de cladodios de <i>Opuntia</i> spp. y <i>Nopalea</i> sp., producidos en hidroponía.....	28
Figura 10. Contenido de cenizas en cladodios (<i>Opuntia</i> y <i>Nopalea</i>) de cuatro estadios de crecimiento producidos en hidroponía.....	30
Figura 11. Efecto del estadio de crecimiento a la cosecha en la productividad del nopal en hidroponía.....	47
Figura 12. Efecto del genotipo en la productividad del nopal en hidroponía.....	49
Figura 13. Efecto del desarrollo a la cosecha en la productividad de nopales en hidroponía.....	51

Resumen general

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto del estadio de crecimiento en la productividad y la calidad nutricional (materia seca, MS; proteína cruda, PC; fibra insoluble en detergente neutro y ácido, FDN y FDA; y cenizas) de *Nopalea cochenillifera*, *Opuntia ficus-indica*, *O. robusta* ssp. *larreyi* y *O. undulata* x *O. tomentosa*, en hidroponía bajo invernadero, además de explorar el efecto de la temperatura del aire en la productividad. Los cladodios se evaluaron en cuatro estadios de crecimiento (EC1, EC2, EC3 y EC4; desde nopalito tierno hasta cladodio desarrollado). En general, el género *Opuntia* fue estadísticamente más productivo que *Nopalea*. La productividad del nopal se incrementó significativamente y en forma directa con el EC, pero a una tasa distinta entre especies, en el EC4 la productividad de *O. undulata* x *O. tomentosa* (117.6 t de MS ha⁻¹ día⁻¹) fue estadísticamente la mayor. La productividad de *O. robusta* ssp. *larreyi* se correlacionó significativamente ($r= 0.5307$, $p<0.001$ y $r= -0.4622$, $p<0.01$) con las temperaturas medias de máximas y de mínimas, respectivamente; *O. undulata* x *O. tomentosa* sólo se correlacionó ($r= 0.3253$, $p<0.05$) con la temperatura máxima. El porcentaje de MS de los EC1 fue el mayor ($p<0.001$); con el desarrollo dicho valor disminuyó significativamente hasta un punto de inflexión, a partir del cual tendió nuevamente a aumentar; pero la tasa de disminución y el punto de inflexión fueron distintos entre especies; *N. cochenillifera* presentó el mayor ($p<0.05$) porcentaje de MS. La PC en la MS de los cladodios disminuyó significativamente de 21.7 % en los EC1 a 16.9 % en los EC4, sin diferencias estadísticas entre especies. *O. ficus-indica* presentó los mayores porcentajes de FDN y FDA (34.4 y 17.6%) y *N. cochenillifera* los menores (24.5 y 25.2 %); los contenidos de FDN y FDA se incrementaron significativamente con el crecimiento. Las cenizas en la MS se incrementaron significativamente con el crecimiento, de 26.4 % en los EC1 a 31.9 % en los EC4; no obstante, la tasa de incremento fue distinta entre especies. Las mejores características nutricionales las presentaron *N. cochenillifera* en todos los estadios y los EC1 y EC2 de cada especie.

Introducción general

La productividad vegetal se define como la velocidad a la que se almacena la energía por la actividad fotosintética (Odum, 1972) y refleja los efectos acumulativos de los factores que influyen sobre el crecimiento (Nobel, 1998). La productividad de los bosques templados y las selvas tropicales es 8 y 28 veces mayor que la productividad de las zonas áridas, respectivamente (Smith y Smith, 2001). No obstante, las zonas áridas son importantes para la producción vegetal y animal (Fischer y Turner, 1978). En estas regiones el crecimiento vegetal y por ende la productividad primaria y la secundaria, son limitados por la poca disponibilidad de agua durante el año, sus variaciones de un año a otro (Fischer y Turner, 1978) y las condiciones ambientales extremas, principalmente la temperatura. Así, el estrés hídrico genera rendimientos bajos e inestabilidad en la producción de cosechas (Kanwar, 1978). Por otro lado, en los agostaderos la producción de forraje es determinada por el patrón de las escasas lluvias. Por lo anterior, existe una alimentación deficiente del ganado y consecuentemente, su productividad es baja (de Alba, 1971).

Por morfología, anatomía y principalmente su fisiología tipo MAC (metabolismo ácido de las crasuláceas), los nopales son eficientes en la utilización del agua. El aumento de la productividad del nopal se relaciona de manera directa con las prácticas de manejo proporcionadas. Flores y Olvera (1994) indican que en México existen dos sistemas para producir nopalito sobre suelo: el sistema tradicional en hileras y el sistema intensivo en camas, con o sin microtúnel. En este último la productividad es hasta siete veces mayor que cuando se cultiva en el sistema tradicional en hileras (Flores y Olvera, 1994). Además de incrementar la productividad, el aporte de nutrimentos como estiércol, fertilizantes o ambos, también incrementa la calidad forrajera de los cladodios de nopal (Nobel *et al.*, 1987; Gregory y Felker, 1992; Gonzaga y Cordeiro, 2005). Incluso se señala que cuando se les proporcionan condiciones óptimas durante su desarrollo como en la hidroponía, su productividad y calidad nutrimental se incrementan al grado que pueden ser iguales o mayores que las de cultivos y forrajes como el maíz, la alfalfa, el sorgo, etc. (Nobel, 1998; Mondragón-Jacobo *et al.*, 2001).

En México, los brotes vegetativos de los nopales se utilizan principalmente como alimento para humanos y como forraje. En las regiones de clima seco sobresale el uso de

nopales del género *Opuntia*, mientras que en las zonas de clima cálido subhúmedo el género que se aprovecha es *Nopalea* (Sánchez-Venegas, 1995). Flores y Olvera (1994) mencionan que en México, por el volumen de nopal que se utiliza, el uso forrajero es el más importante. Sin embargo, las plantaciones para producción de nopal forrajero son poco frecuentes (López, 2001). De manera que las principales proveedoras de nopal para forraje son las poblaciones silvestres, que presentan un grado alto de deterioro por la extracción elevada. Además del uso actual que se le da al nopal, su importancia crece por el uso potencial de los productos derivados de los cladodios (mucílago, goma, etc.) y por sus características medicinales, nutritivas, dietéticas, etc. (Sáenz, 2004).

Así, en el aprovechamiento de los brotes vegetativos del nopal existen dos vertientes principales; nopalito para consumo humano y cladodios desarrollados para forraje. Existen diversos trabajos que han evaluado el rendimiento (Orona *et al.*, 2000; Luna-Vázquez, 2001; Murillo-Amador *et al.*, 2001; Flores *et al.*, 2004) y algunos otros la productividad del nopal (Nobel, 1998; Gonzaga y Cordeiro, 2005). En México, existen trabajos sobre el rendimiento de nopalito (Flores y Olvera, 1994), mientras que en otras partes del mundo, se ha estudiado la productividad del nopal como forraje (Gonzaga y Cordeiro, 2005). Algunas prácticas agronómicas como densidad de plantación, cultivares, fertilización, salinidad, irrigación o protección contra heladas han sido usualmente los factores evaluados. Sin embargo, se destaca en algunos casos la carencia de información de otros factores ambientales como la temperatura, que juega un papel importante en el crecimiento de los nopales (Nobel, 1998). Además, los estudios realizados en relación con la producción son poco precisos en virtud que el criterio para realizar la cosecha se ha basado principalmente en periodos de tiempo fijos. Es decir, se programan periodos iguales para cada cosecha poco relacionados con la variación natural en el crecimiento de los cladodios, pues la tasa de crecimiento es diferente durante el año. Por lo anterior, la información generada corresponde a una escala amplia de tamaños de los cladodios disponibles al momento del corte. Aunado a lo anterior, se indica que la calidad de los cladodios de nopal, para uso forrajero y para consumo como nopalitos, se reduce en relación con el desarrollo, la especie o cultivar y las prácticas de manejo proporcionadas (Rodríguez-Félix y Cantwell, 1988; López *et al.*, 1992; Flores *et al.*, 1995). De manera que cuando se pretende considerar la calidad como un factor decisivo para realizar el

aprovechamiento de cladodios para forraje o como nopalito, los datos de producción disponibles son poco adecuados.

Por lo anterior, el objetivo general de este trabajo fue evaluar la productividad y la calidad forrajera del nopal producido en hidroponía e invernadero, considerando las dos formas de aprovechamiento, nopalito y forraje. Además, explorar la asociación de dicha productividad con la temperatura. Así, los objetivos particulares fueron los siguientes:

- Determinar los atributos nutrimentales de cuatro especies de nopal en cuatro estadios de crecimiento.
- Evaluar la productividad de cuatro especies de nopal en cuatro estadios de crecimiento, dos como nopalito y dos como forraje.
- Analizar la asociación de la productividad con la temperatura del aire.

Se postula que el cultivo hidropónico incrementa tanto la productividad como la calidad nutrimental de nopal, y que ambas características dependen del estadio de desarrollo. Además, que las condiciones homogéneas de producción permiten explorar la capacidad genética de las especies evaluadas a través de: 1) su calidad nutrimental y 2) su productividad.

LITERATURA CITADA

- De Alba, J. 1971. Alimentación del ganado en América Latina. 2ª ed. La Prensa Médica Mexicana. México, D.F. México. 475 p.
- Fischer, R.A.; N.C. Turner. 1978. Plant productivity in the arid and semiarid zones. *Annual Review of Plant Physiology*. 29: 277-317.
- Flores H., A.; M. Murillo S.; F. Borrego E.; J.L. Rodríguez O. 1995. Variación de la composición química en estratos de la planta de 20 variedades de nopal. En: E. Pimienta B.; C. Neri L.; A. Muñoz V.; E.M. Huerta M. (Eds.). Memoria del VI Congreso Nacional y IV Congreso Internacional sobre Conocimiento y

- Aprovechamiento del Nopal. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México. pp. 110-115.
- Flores V., C.A.; J. Olvera M. 1994. El sistema-producto nopal verdura en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos; Universidad Autónoma Chapingo; Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial. Chapingo, Estado de México. México. 150 p.
- Flores H., A.; I. Orona C.; B. Murillo A.; R.D. Valdez C.; J.L. García H. 2004. Producción y calidad de nopalito en la región de la comarca lagunera de México y su relación con el precio en el mercado nacional. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*. 6: 23-34.
- Gonzaga de A., S.; D. Cordeiro dos S. 2005. Palma forrageira. Em: L.H. Piedade; E. Assis M. (Eds.). *Espécies vegetais exóticas com potencialidades para semi-árido brasileiro*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Brasília, D.F. Brasil. pp. 91-127.
- Gregory, R.A.; P. Felker. 1992. Crude protein and phosphorus contents of eight contrasting *Opuntia* forage clones. *Journal of Arid Environments*. 22: 323-331.
- Kanwar, J.S. 1978. Crops of the arid and semi-arid areas of India – problems and potentials. In: S. Mann H. (Ed.). *Arid zone research and development*. International Symposium on Arid Zone Research Institute. Scientific Publishers. Jodhpur, India. pp. 199-204.
- López D., M.; A. López J.; C. Pérez M.; P. Cruz H. 1992. Respuesta del nopal (*Opuntia ficus-indica*) a la fertilización de N,P,K, mediante aspersion de los cladodios. En: I. Salazar S.; S. López D. (Eds.). *Memoria del V Congreso Nacional y III Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal*. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México. pp. 32.
- López G., J.J. 2001. Usos del nopal forrajero en el norte de México. En: C.A. Flores V. (Ed.). *Memoria del curso-taller “El nopal forrajero, una alternativa alimentaria para el ganado”*. Guadalupe, N.L. México. pp. 41- 51.
- Luna-Vázquez, J. 2001. Tecnología para la producción de nopal verdura. En: Anónimo (Ed.). *V Reunión Científica y Tecnológica, Agrícola, Pecuaria y Forestal*. Fundación Produce San Luis Potosí. San Luis Potosí, SLP. México. s.n.p.
- Mondragón-Jacobo, C.; S de J. Méndez-Gallegos; G. Olmos-Oropeza. 2001. Cultivation of *Opuntia* for fodder production: from re-vegetation to hydroponics. In: C. Mondragón-

- Jacobo; S. Pérez-González (Eds.). Cactus (*Opuntia* spp.) as forage. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. pp. 107-122.
- Murillo-Amador, B.; A. Cortés-Ávila; E. Troyo-Rodríguez; A. Nieto-Garibay; H.G. Jones. 2001. Effects of NaCl salinity on growth and production of young cladodes of *Opuntia ficus-indica*. *Journal of Agronomy & Crop Science*. 187: 269-279.
- Nobel, P.S. 1998. Los incomparables agaves y cactus. Trillas. México, D.F. México. 211 p.
- Nobel, P.S.; C.E. Russell; P. Felker; J. Galo M.; E. Acuña. 1987. Nutrient relations and productivity of prickly pear cacti. *Agronomy Journal*. 79: 550-555.
- Odum, E.P. 1972. *Ecología*. 3ª ed. Interamericana. México, D.F. México. 639 p.
- Orona C., I.; M. Rivera G.; A. Flores H.; J.G. Martínez R. 2000. Producción de nopal hortícola bajo riego por goteo en la comarca lagunera. En: Anónimo. X Congreso Nacional de Irrigación. Simposio 1, Ingeniería de Riego. Chihuahua, Chihuahua. México. pp. 43-56.
- Rodríguez-Félix. A.; M. Cantwell. 1988. Developmental changes in composition and quality of prickly pear cactus cladodes (nopalitos). *Plant Foods for Human Nutrition*. 38: 83-93
- Sáenz, C. 2004. Compuestos funcionales y alimentos derivados de *Opuntia* spp. En: G. Esparza-Fraustro; R.D. Valdez-Cepeda; S. de J. Méndez-Gallegos. (Eds.). *El Nopal, tópicos de actualidad*. Universidad Autónoma Chapingo – Colegio de Postgraduados. México. pp. 211-222.
- Sánchez-Venegas, G. 1995. Estimación del área fotosintética caulinar de *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dick. En: E. Pimienta, B.; C. Neri L.; A. Muñoz U.F.; M. Huerta M. (Comp.). *Memoria del VI Congreso Nacional y IV Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal*. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco. México. pp. 103-106.
- Smith, R.L.; T.M. Smith. 2001. *Ecología*. 4ª ed. Pearson. Madrid. España. 642 p.

**I Características nutrimentales de cladodios de *Opuntia* spp. y *Nopalea* sp.
producidos en hidroponía**

I Características nutrimentales de cladodios de *Opuntia* spp. y *Nopalea* sp. producidos en hidroponía

Hugo Magdaleno Ramírez Tobías¹, Juan Antonio Reyes Agüero², Juan Manuel Pinos Rodríguez², Juan Rogelio Aguirre Rivera²

¹ Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales, Área de Recursos Naturales Renovables. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí. México. e-mail, rthugo@yahoo.com

² Instituto de Investigación de Zonas Desérticas y Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Altair Núm. 200 Fracc. Del Llano. 78377 San Luis Potosí, S.L.P. México.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la calidad nutrimental de cladodios de *Opuntia* y *Nopalea* producidos en hidroponía, a través de su contenido de materia seca (MS), proteína cruda (PC), fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA) y cenizas. Los factores estudiados fueron: especie (*Nopalea cochenillifera*, *Opuntia robusta* ssp. *larreyi*, *O. undulata* x *O. tomentosa* y *O. ficus-indica*) y estadio de crecimiento (EC) (cuatro niveles, desde nopalito tierno -EC1- hasta cladodio bien desarrollado -EC4-). El porcentaje de MS de los EC1 fue estadísticamente mayor que en los otros EC, dicho valor disminuyó significativamente con el crecimiento hasta un punto de inflexión, a partir del cual aumentó, la tasa de disminución y el punto de inflexión fueron distintos entre especies, en general *N. cochenillifera*, presentó el mayor porcentaje de MS. El contenido de PC fue estadísticamente similar entre especies, pero no entre los EC; así, la PC disminuyó significativamente, de 21.7 % en los EC1 a 16.9 % en los EC4 y fue estadísticamente similar entre los EC3 y los EC4. *O. ficus-indica* presentó los mayores porcentajes de FDN y FDA (34.4 y 17.6%), y *N. cochenillifera* los menores (24.5 y 25.2 %). En general los contenidos de FDN y FDA se incrementaron significativamente con el crecimiento. Las cenizas en la MS se incrementaron significativamente con el crecimiento, de 26.4 % en los EC1 a 31.9 % en los EC4, no obstante, la tasa de incremento fue distinta entre especies. Las mejores características nutrimentales las presentaron *N. cochenillifera*, independientemente del EC y los EC1 y EC2, independientemente de la especie.

INTRODUCCIÓN

Los nopales (*Opuntia* y *Nopalea*), por su fisiología MAC (metabolismo ácido de las crasuláceas) son atractivos como productores de forraje en las zonas áridas y semiáridas (Flores y Aguirre, 1979; Nobel, 2001; Gonzaga y Cordeiro, 2005). En las plantas con metabolismo MAC la eficiencia en el uso del agua es alta; así, *Opuntia ficus-indica* es de tres a seis veces más eficiente que algunos cultivos altamente productivos con metabolismo C₃ y C₄ (Nobel, 1998). En general los nopales son considerados como forrajes pobres en algunos nutrimentos y fibra, pero ricos en carbohidratos y agua (López-García *et al.*, 2001). Las evaluaciones de la calidad nutrimental del nopal proporcionan resultados muy variables entre especies y variantes de *Opuntia* y *Nopalea*. También presentan variaciones debido a otros factores, como la edad del cladodio y las condiciones agronómicas de producción como tipo de suelo, clima, etc. (Flores y Aguirre, 1979; Rodríguez-Félix y Cantwell, 1988; Nefzaoui y Ben Salem, 2001; López-García *et al.*, 2001; Pinos-Rodríguez *et al.*, 2003). Sin embargo, como Collins y Fritz (2003) lo señalan, la edad es el factor más importante que afecta la calidad forrajera de las plantas.

Las prácticas agronómicas favorecen tanto la productividad como la calidad nutrimental de los cladodios de nopal. Belasco *et al.* (1958) encontraron que con aspersiones foliares de urea (30 kg ha⁻¹), los cladodios mejoraron su contenido de materia seca, nitrógeno y digestibilidad. López *et al.* (1992) señalaron que el número de brotes y el contenido de nitrógeno de los cladodios fueron mayores cuando se aplicaron fertilizantes. Gregory y Felker (1992) encontraron que la proteína cruda se incrementó a más de 11% cuando se aplicó fertilizante. Nobel *et al.* (1987) señalan que la producción de materia seca y los contenidos de nitrógeno y fósforo en los cladodios de *O. engelmannii* se incrementaron significativamente al aumentar las dosis de estos elementos en la fórmula de fertilización. Así, queda claro que al proporcionar al nopal mejores condiciones para su desarrollo, su productividad y calidad forrajera se incrementan.

La hidroponía representa una alternativa para la producción de nopal forrajero en las zonas áridas, donde la disponibilidad de agua es restringida y además existe mucha presión sobre los agostaderos (Mondragón-Jacobo *et al.*, 2001). Calderón (1995) menciona que el nopal cultivado en hidroponía reaccionó favorablemente a la aplicación de nutrimentos. Con este sistema de producción el contenido de proteína de los cladodios alcanzó valores de hasta

18.1 %, y el de cenizas varió de 18.7 a 30.3 % (Mondragón-Jacobo *et al.*, 2001); estos valores son elevados si se comparan con los presentes en cladodios producidos en suelo (5.1 % de PC y 20.4 % de cenizas) (de Alba, 1971). Además, la producción de forraje de nopal en hidroponía puede ser una forma importante de aportar Ca, P, K y Zn al ganado. De hecho, el contenido nutrimental de algunos cultivares de nopal producidos en hidroponía fue similar al de forrajes como alfalfa, maíz ensilado y zacates, y mucho mayor que el de rastros y nopal silvestre (Mondragón-Jacobo *et al.*, 2001).

Sin embargo, las evaluaciones de atributos bromatológicos de cladodios producidos en hidroponía, no proporcionan información suficiente que permita evaluar el efecto de la especie sobre su calidad. Además, no se ha analizado el efecto del desarrollo del cladodio en la calidad forrajera de los nopales producidos en hidroponía. Así, este trabajo tiene como objetivo evaluar la calidad nutrimental de cladodios de tres especies de *Opuntia* y una de *Nopalea* producidos en hidroponía, en cuatro estadios de crecimiento.

Se postula que la calidad nutrimental del nopal es diferente entre especies y disminuye directamente con la edad. Además, que la calidad nutrimental de los cladodios producidos en hidroponía es superior a la registrada para nopal desarrollado en suelo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se estableció en noviembre de 2004 en un invernadero de techo curvo, con estructura de tubo galvanizado y cubierto con materiales plásticos (polietileno y malla sombra, ésta última como segunda cubierta en el techo). Dicho invernadero se encuentra instalado en la comunidad San José de la Peña, Mpio. de Villa de Guadalupe, S.L.P., México. La planta del invernadero tiene forma rectangular alineada longitudinalmente en dirección este-oeste. San José de la Peña es una comunidad de caprinocultores situada 220 km al norte de la ciudad de San Luis Potosí. Las coordenadas geográficas y altitud del sitio son: 23° 15' 00'' Latitud Norte, 100° 45' 20'' Longitud Oeste y 1735 m, respectivamente (Anónimo, 1976). El clima corresponde a la fórmula $BS_{ohw}''(e)$, de un clima seco semicálido, con temperatura promedio anual entre 18 y 22 °C y temperatura promedio del mes más frío menor que 18 °C. Presenta un régimen de lluvias de verano con un periodo seco intermedio (canícula) e invierno fresco. La temperatura mínima promedio anual oscila entre 8 y 12 °C, y en enero

este promedio disminuye hasta 4 y 8 °C (Anónimo, 1970; García, 1988). Se considera un clima extremo (Anónimo, 1992); es decir, la diferencia de temperatura media entre el mes más frío y el mes más caliente es de 5 a 7 °C (García, 1988).

El medio hidropónico utilizado fue un sistema de cultivo en gravilla (Sánchez y Escalante, 1983), formado por cuatro unidades (bancales) de 1.8, 1.2 y 0.3 m de longitud, anchura y profundidad, respectivamente. La solución nutritiva se aplicó por subirrigación y se drenó por gravedad, para reciclarse a través de un sistema de recolección y conducción. Para facilitar el drenaje, los bancales presentaron una pendiente ligera y se colocaron en un nivel superior con respecto al depósito de la solución nutritiva. La gravilla fue de tezontle (dióxido de hierro, es un basalto vesicular químicamente inerte de color rojo o negro; López-Ramos, 1993) con un diámetro promedio de partícula de 2 a 4 mm, la gravilla se lavó con agua corriente y se desinfectó con una solución de cloro al 2% (Calderón, 1995).

Se empleó una solución nutritiva utilizada en trabajos previos con plantas de nopal (Cuadro 1). El riego se suministró dos veces por día (9:00 y 13:00 h), cada tercer día (Olmos *et al.*, 1999). Antes de realizar el riego, el pH de la solución nutritiva se ajustó a 5.8 (Calderón, 1995). Las mermas en el volumen de la solución se restituyeron cuando alcanzaron el 20% del volumen inicial, y toda la solución nutritiva se reemplazó cada 15 días (Sánchez y Escalante, 1983).

Cuadro 1. Composición de la solución nutritiva (Calderón, 1995; Gallegos-Vázquez *et al.*, 2000) y fórmula química de las sustancias utilizadas.

Elemento	Concentración mg L ⁻¹	Fuente
N	150.0	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O
Ca	210.0	
P	40.0	KH ₂ PO ₄
K	225.0	K ₂ SO ₄
Mg	40.0	MgSO ₄ ·4H ₂ O
Fe	5.0	Kelato de Fe
Mn	2.0	MnSO ₄ ·4H ₂ O
Cu	0.1	CuSO ₄ ·5H ₂ O
Zn	0.2	ZnSO ₄ ·7H ₂ O
B	0.6	H ₃ BO ₃
Mo	0.05	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O

Material biológico

Se evaluaron cuatro especies inermes cuyos brotes vegetativos se utilizan tradicionalmente como nopalito y forraje: *Nopalea cochenillifera* (Tamazunchale), *O. robusta* ssp. *larreyi* (Tapón pelón), *O. ficus-indica* (Tlaconopal) y la especie híbrida *O. undulata* x *O. tomentosa* (Valtierrilla). Los brotes se cosecharon al alcanzar cada uno el estadio de crecimiento (EC) o tamaño, según el tratamiento correspondiente. Los estadios de crecimiento se establecieron al dividir entre cuatro la longitud total del cladodio maduro de cada especie (Cuadro 2).

Cuadro 2. Amplitudes de tamaño (cm) de los cuatro estadios de crecimiento de cladodios de *Opuntia* y *Nopalea*, producidos en hidroponía.

Estadio de crecimiento	Especie			
	<i>N. cochenillifera</i> (Tamazunchale)	<i>O. robusta</i> ssp. <i>larreyi</i> (Tapón pelón)	<i>O. undulata</i> x <i>O. tomentosa</i> (Valtierrilla)	<i>O. ficus-indica</i> (Tlaconopal)
EC1	5 – 7	7 – 10	8 – 11	8 – 11
EC2	10 – 13	15 – 18	16 – 19	17 - 20
EC3	16 – 19	23 – 26	24 - 27	26 - 29
EC4	> 23	> 31	> 33	> 40

Las muestras se recolectaron durante el periodo marzo-agosto de 2005. Lo anterior debido que los muestreos dependieron del crecimiento de los cladodios y no de fechas predeterminadas (Cuadro 2). Así, durante cada sesión de cosecha se recolectaron los cladodios disponibles de acuerdo con su tratamiento, lo anterior se realizó hasta completar la cantidad de muestra suficiente para los análisis de laboratorio.

Análisis de muestras

La calidad nutrimental de los cladodios se evaluó en laboratorio a través de los atributos siguientes. La materia seca (MS), proteína cruda (PC) y cenizas se estimaron de

acuerdo con los métodos propuestos por la Association of Official Analytical Chemists (Anónimo, 1990a). El contenido de MS resultó de la deshidratación de la muestra a 55 °C en un horno de aire forzado marca FELISA, hasta peso constante. La PC se estimó con el método Kjeldahl; para ello, la muestra (proteína-nitrógeno) se convirtió a sulfato ácido de amonio por digestión con ácido sulfúrico y calor, en presencia de un catalizador. Este proceso se realizó en un digestor marca BÜCHI K-437. Posteriormente, en una unidad de destilación marca BÜCHI b-324 la materia orgánica desintegrada se neutralizó con hidróxido de sodio liberándose amoníaco, el cual se destiló por arrastre con vapor en una solución de ácido bórico para formar tetraborato de amonio. El nitrógeno se cuantificó por titulación con ácido clorhídrico previamente valorado. Finalmente, la PC se calculó multiplicando la cantidad de nitrógeno obtenida por el factor 6.25. Las cenizas se obtuvieron al someter la muestra a 600 °C en un incinerador marca Barnstead Termolyne, durante 2 horas. Las fibras insolubles en detergente neutro (FDN) y en detergente ácido (FDA) se cuantificaron con la metodología de Goering y van Soest (1970), para lo cual las muestras se sometieron a un proceso de digestión con el detergente neutro o ácido, respectivamente. Posteriormente, el detergente y el residuo se separaron por filtración en papel Whatman # 541, mediante la aplicación de una fuerza de succión con una bomba de vacío. El residuo y el filtro se colocaron en la estufa a 55 °C por 48 horas para eliminar la humedad y posteriormente cuantificar el residuo.

Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño experimental empleado fue un diseño de bloques completos al azar, con un arreglo factorial de tratamientos (16), con cuatro repeticiones. Los factores (y niveles) fueron: especies de nopal (cuatro) y estadios de crecimiento (cuatro) (Cuadro 2). Se evaluaron en total 64 unidades experimentales (UE). Las determinaciones de laboratorio se realizaron por triplicado y se calculó el promedio para cada UE. Se utilizó el procedimiento GLM y la prueba de comparación de medias LSMEANS del programa SAS (Anónimo, 1990b). El modelo estadístico empleado fue:

$$Y_{ijk} = \mu + \rho_i + \alpha_j + \gamma_k + (\alpha\gamma)_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

- Y_{ijk} , es el valor observado de la variable en estudio
- μ , es la media de los tratamientos
- ρ_i , es efecto del bloque al i -ésimo nivel
- α_j , es el efecto del factor A al j -ésimo nivel
- γ_k , es el efecto del factor B al k -ésimo nivel
- $\alpha\gamma_{jk}$, es la interacción de los factores A y B
- ε_{ij} , es el error aleatorio

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Materia seca

El porcentaje medio de MS de los cladodios de nopal producidos en hidroponía fue 4.5 % \pm 0.8. Este valor es bajo comparado con el registrado para nopal cultivado en suelo (Flores y Aguirre, 1979; Pinos-Rodríguez *et al.* 2003). Nefzaoui y Ben Salem (2001) mencionan que el contenido de MS del nopal es más alto durante la época seca del año. Por su parte, Flores y Aguirre (1979) señalan que existe una relación directa entre la precipitación pluvial antes del corte y el contenido de agua de los cladodios. Lo anterior es comprensible debido a que los cladodios de nopal por su anatomía permiten almacenar agua (Gibson y Nobel, 1986). Además, la capacidad de las cactáceas para absorber agua, es alta (Nobel, 1998). Así, esta capacidad y el suministro constante del líquido proporcionado con la hidroponía, explican el contenido bajo de MS que en general presentaron los cladodios de *Opuntia* y *Nopalea* en esta investigación.

Mondragón-Jacobo *et al.* (2001) encontraron en cladodios producidos en hidroponía, porcentajes de MS medios, máximos y mínimos de 7.0, 7.7 y 5.4 %, respectivamente. Sin embargo, estos valores corresponden a plantas con cladodios terminales, subterminales y antesubterminales de seis meses de edad. En relación con lo anterior, Bauer y Flores (1969) citados por Flores y Aguirre (1979) y Flores *et al.* (1995) encontraron mayor porcentaje de MS en cladodios antesubterminales y subterminales que en cladodios terminales. Las diferencias del contenido de MS en relación con la edad persisten en los cladodios producidos en hidroponía, como se detallará mas adelante.

El análisis de varianza señala diferencias altamente significativas del contenido de MS, debidas tanto a los factores especie y estadio de crecimiento, como a su interacción (Cuadro 3). La variabilidad debida a la especie coincide con lo encontrado por Pinos-Rodríguez *et al.*

(2003) y Mondragón-Jacobo *et al.* (2001) en nopal producido en suelo e hidroponía, respectivamente.

El porcentaje de MS de *N. cochenillifera* fue superior ($p < 0.001$) al del resto de las especies. *O. robusta* ssp. *larreyi* presentó la mayor cantidad de agua; su porcentaje de MS fue menor ($p < 0.05$) que el de *O. undulata* x *O. tomentosa* y que el de *O. ficus-indica*, y mucho menor ($p < 0.001$) que el de *N. cochenillifera* (Figura 1). Lo anterior coincide con lo encontrado por Santos *et al.* (1990), quien comparó el contenido de MS de *O. ficus-indica* con *N. cochenillifera*. A la vez, Pinos-Rodríguez *et al.* (2003) encontraron que *O. robusta* ssp. *robusta* presentó menor porcentaje MS que *O. ficus-indica* y *O. rastrera*. Estos resultados indican una mayor succulencia de las dos subespecies de *O. robusta*.

Los resultados de este estudio sugieren una relación probable entre adaptación (capacidad y/o utilidad de almacenar agua) y la precipitación media anual de las regiones de origen de las especies evaluadas. Así, *N. cochenillifera* con el menor contenido de agua, proviene de climas donde la precipitación anual es de unos 1,000 mm; en contraste, *O. robusta* ssp. *larreyi* presentó el mayor contenido de agua y la región de donde procede tiene una precipitación anual de unos 400 mm. *O. undulata* x *O. tomentosa* y *O. ficus-indica* presentaron un contenido de agua intermedio (Figura 1), y sus regiones de procedencia también presentan precipitaciones anuales intermedias (unos 700 mm). Así, parecería que al cultivar estas especies en condiciones ilimitadas de humedad, conservaron sus reacciones diferenciales con respecto a su capacidad de almacenar agua.

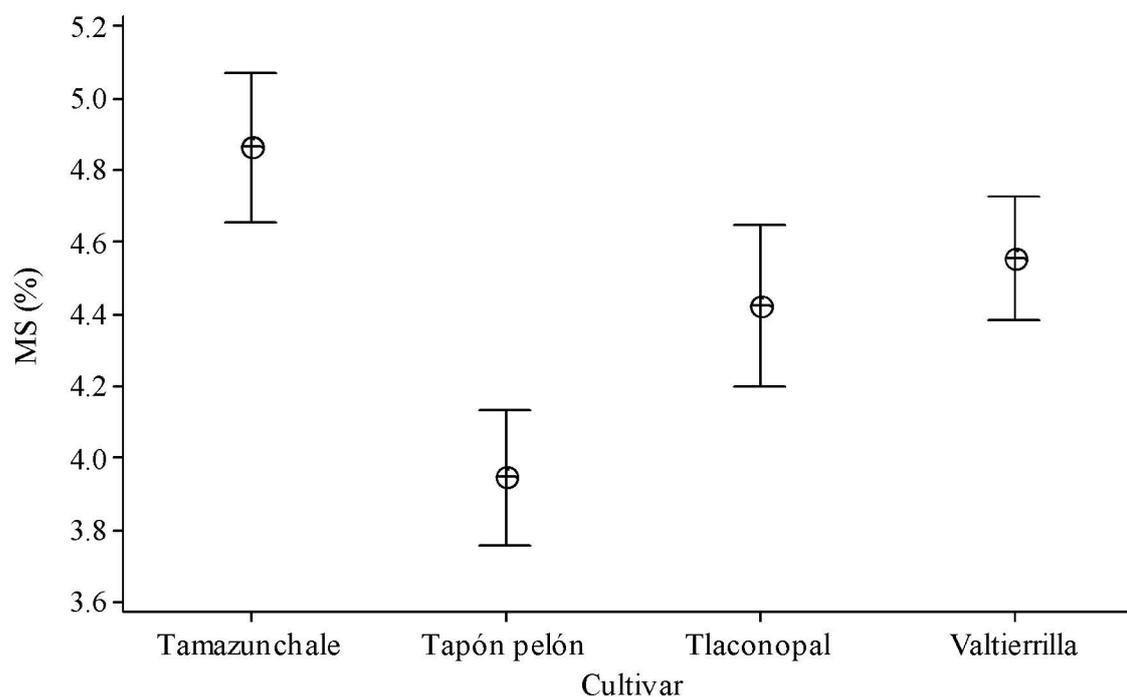


Figura 1. Contenido de materia seca de cladodios de *Opuntia* spp. y *Nopalea* sp., producidos en hidroponía. (Tamazunchale, *N. cochenillifera*; Tapón pelón, *O. robusta* ssp. *larreyi*; Tlaconopal, *O. ficus-indica* y Valtierra, *O. undulata* x *O. tomentosa*). Las barras indican el error estándar.

El contenido de agua de los cladodios se relaciona también con el contenido de mucílago. Goldstein *et al.* (1991) señalan que el mucílago puede retener hasta un 30% del total del agua almacenada en el parénquima. A la vez, cuando el mucílago se expone a 100 % de humedad relativa, su peso se incrementa en un 75 % (Trachtenberg y Meyer, 1981). Por su parte, Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta (2004) encontraron cantidades diferentes de mucílago en nopalitos de distintos cultivares de *Opuntia*. De manera que existe la posibilidad que la diferencia en el contenido de agua encontrada en las especies estudiadas se deba en parte a su contenido de mucílago. Sin embargo, se carece de información sobre el contenido de mucílago de las especies evaluadas en este estudio.

Cuadro 3. Características nutrimentales de cladodios de *Opuntia* spp. y *Nopalea* sp., de cuatro estadios de crecimiento, producidos en hidroponía.

Atributo ^a	Estadio de crecimiento 1				Estadio de crecimiento 2				Estadio de crecimiento 3				Estadio de crecimiento 4				Significación estadística			
	N	Tl	Tp	V	E.E.	SP	EC	SP*EC												
MS	6.2	5.8	5.1	5.6	4.6	4.3	3.5	4.0	4.5	3.7	3.4	4.1	4.2	3.9	3.8	4.6	0.14	***	***	**
PC	19.3	20.9	21.2	20.9	17.2	22.4	24.0	23.3	15.1	17.5	21.0	17.2	14.9	17.2	18.1	17.6	2.58	N.S.	*	N.S.
FDN	31.3	33.1	33.0	28.3	24.1	31.6	22.7	23.5	20.3	33.2	28.7	23.6	22.6	39.8	38.4	37.2	3.35	**	**	N.S.
FDA	16.0	15.0	14.7	16.3	14.0	16.4	14.1	15.1	14.9	19.9	17.0	16.1	16.1	19.3	15.7	19.7	1.10	**	**	N.S.
Cenizas	28.0	23.3	27.2	27.0	28.7	27.8	28.8	27.5	29.5	33.5	33.3	32.2	32.3	33.4	29.6	29.0	1.16	N.S.	***	*

^a Todos los atributos excepto MS se expresan como porcentajes de la materia seca.

MS, materia seca; PC, proteína cruda; FDN, fibra insoluble en detergente neutro; FDA, fibra insoluble en detergente ácido.

N, Tamazunchale (*N. cochenillifera*); Tl, Tlaconopal (*O. ficus-indica*); Tp, Tapón pelón (*O. robusta* ssp. *larreyi*);

V, Valtierrilla (*O. undulata* x *O. tomentosa*).

E.E., error estándar.

SP, especie; EC, estadio de crecimiento; SP *EC, interacción especie*estadio de crecimiento.

* Significación estadística al 0.05.

** Significación estadística al 0.01.

*** Significación estadística al 0.001.

N.S. Sin significación estadística.

En todas la especies evaluadas, EC1 presentó mayor porcentaje de MS que EC2 y EC4 ($p < 0.05$) y que EC3 ($p < 0.001$) (Figura 2). Lo anterior parece relacionarse con el alto contenido de FDN en el EC1. En efecto, los cladodios jóvenes presentan mayor actividad metabólica, la cual sucede principalmente en el clorénquima (Nobel, 1983), y el peso seco del clorénquima es casi el doble que el del parénquima (Nobel *et al.*, 1987); a la vez, la relación área/volumen es mayor en los estadios de crecimiento jóvenes (Ramírez-Tobías *et al.*, 2005). Con el crecimiento aumenta la superficie fotosintética (clorénquima), pero más el volumen del cladodio (parénquima), y consecuentemente el contenido de agua.

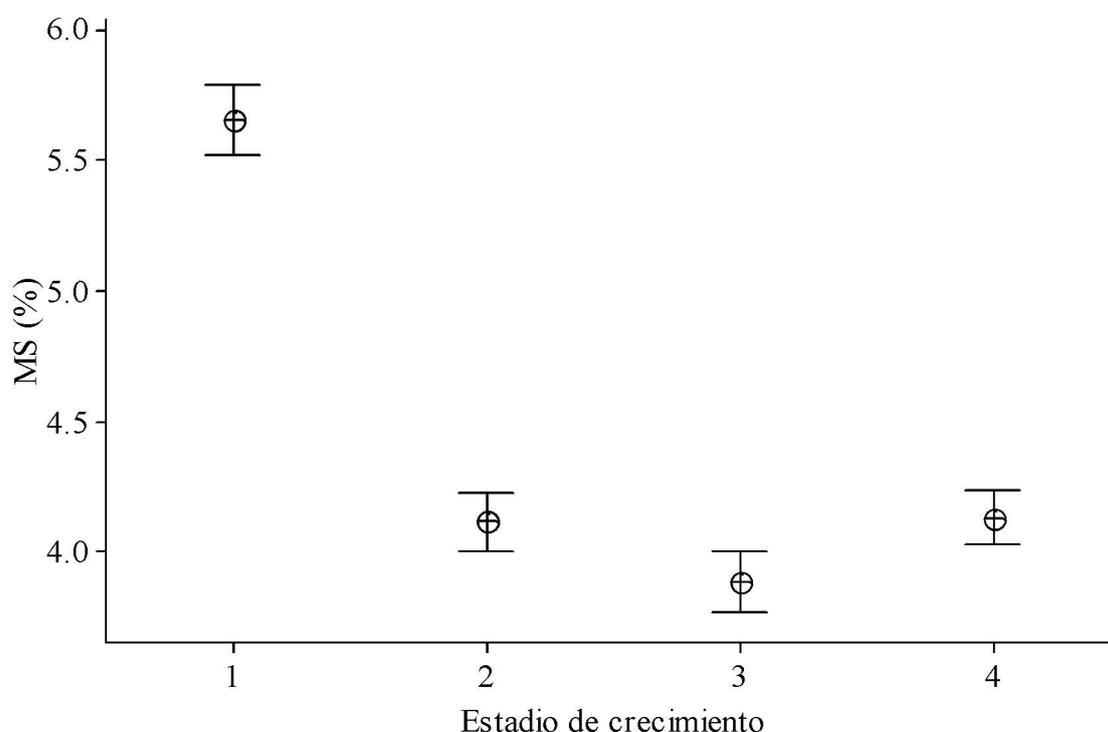


Figura 2. Efecto de la madurez en el contenido de materia seca de cladodios de *Opuntia* spp. y *Nopalea* sp., producidos en hidroponía. Las barras indican el error estándar.

El contenido de MS del EC4 fue mayor ($p < 0.05$) que el del EC3. Rodríguez-Félix y Cantwell (1988) señalan que en su estadio de crecimiento 5 (similar al intervalo del EC3 al EC4, del presente estudio) sucede un incremento del grosor del cladodio debido al desarrollo del parénquima medular. Así, el EC3 parece ser el punto de inflexión de la curva decreciente

del contenido de MS en relación con el crecimiento (Figura 2). Es decir, que a partir de ese estadio, el contenido de MS tiende a incrementarse con la edad; esto en buena parte puede corresponder a la acumulación de hemicelulosa y lignina asociada a la madurez de los tejidos. Los estudios del contenido de MS en la etapa posterior al crecimiento total del cladodio indican que efectivamente, el valor de este parámetro se incrementa con la edad. Así, Bauer y Flores (1969) citados por Flores y Aguirre (1979) encontraron 11.4, 13.3 y 15.3 % de MS en cladodios terminales, subterminales y antesubterminales, respectivamente. Por su parte, Flores *et al.* (1995) obtuvieron 9.1, 11.1 y 13.6 % de MS en brote (terminal), penca (subterminal) y tallo (antesubterminal), respectivamente.

La interacción especie*estadio de crecimiento en el contenido de MS resultó altamente significativa (Cuadro 3), en coincidencia con lo encontrado por Duque (2003). En este caso, las diferencias se observan en las especies *O. ficus-indica* y *O. undulata* x *O. tomentosa*, en EC3 y EC4 (Figura 3). Así, en el EC3 el contenido de MS de *O. ficus-indica* disminuyó hasta ser estadísticamente similar al que presentó *O. robusta* ssp. *larreyi*, que presentó la menor cantidad MS en todos los estadios de crecimiento. De manera opuesta, el porcentaje de MS de *O. undulata* x *O. tomentosa* se incrementó significativamente de EC2 y EC3 a EC4. En EC4, *O. undulata* x *O. tomentosa* presentó el mayor contenido de MS, con diferencias altamente significativas con respecto a *O. ficus-indica* y *O. robusta* ssp. *larreyi*, pero sin diferencia estadística con *N. cochenillifera* (Figura 3). La significación estadística encontrada en la interacción de los factores, indica que el punto de inflexión (estadio) del decremento de MS en relación con la edad fue diferente en las especies. Así, *O. robusta* ssp. *larreyi* y *O. ficus-indica* presentan el incremento a partir de EC3 y *O. undulata* x *O. tomentosa* lo inicia entre EC2 y EC3. Sin embargo, *N. cochenillifera* parece presentar un patrón diferente de madurez (lignificación) de los cladodios, lo cual podría ser una diferencia de género.

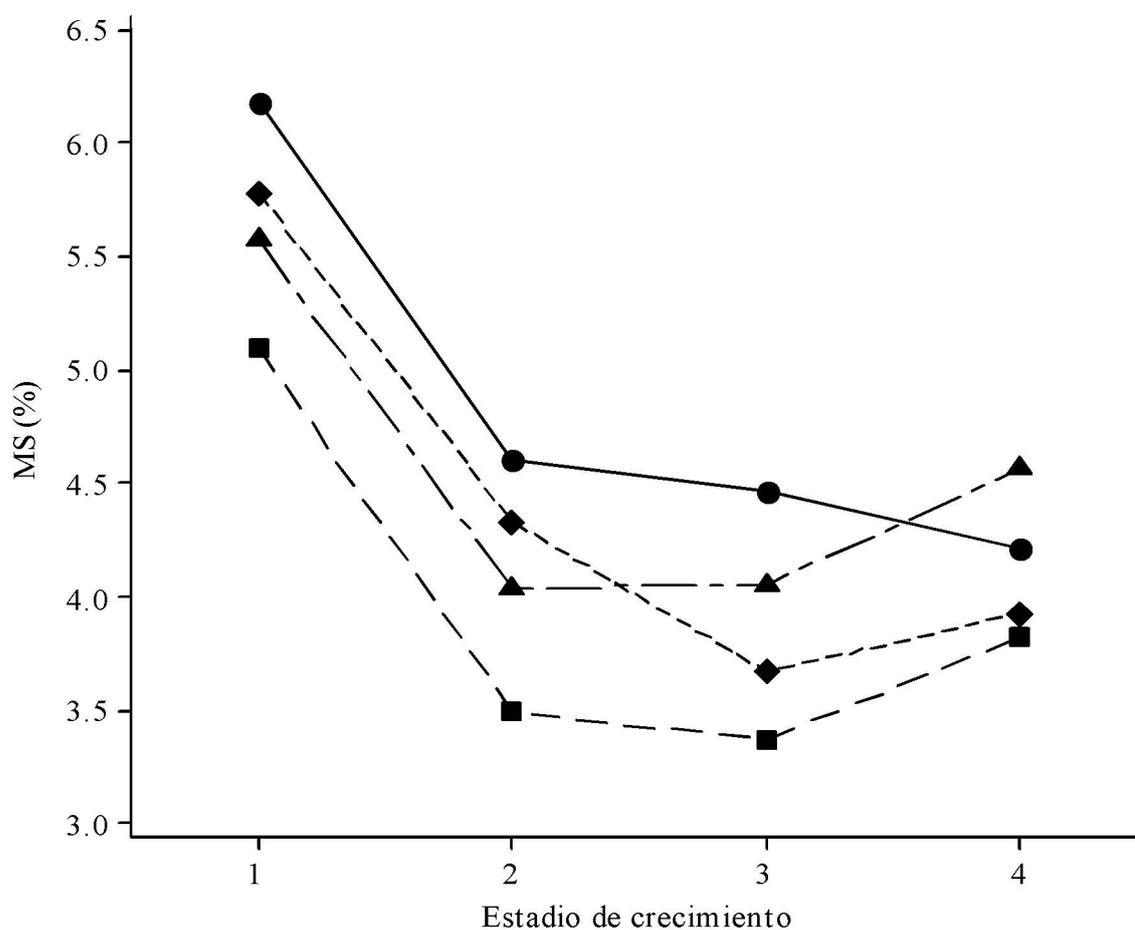


Figura 3. Contenido de materia seca de cladodios (*Opuntia* y *Nopalea*) de cuatro estadios de crecimiento producidos en hidroponía. (—●— *N. cochenillifera*, —■— *O. robusta ssp. larreyi*, —◆— *O. ficus-indica* y —▲— *O. undulata* x *O. tomentosa*).

Proteína cruda

Los cladodios de los nopales estudiados presentaron un contenido medio de PC de 19.2 % \pm 5.2. Este valor es mayor que el registrado para cladodios de *Opuntia* y *Nopalea* desarrollados en suelo (Santos *et al.*, 1990; Gregory y Felker, 1992; Pinos-Rodríguez *et al.*, 2003), y también mayor que el de cladodios de *Opuntia* producidos en hidroponía (Mondragón-Jacobo *et al.*, 2001). Este valor de PC es incluso mayor que el que presenta la

materia seca de la alfalfa verde (de Alba, 1971). González (1989) concluyó que la PC de cladodios de *O. lindheimeri* aumentó directamente con el incremento de fertilizante nitrogenado. De manera similar, Nobel (1983) encontró que el nitrógeno en el tejido de *O. chlorotica* se incrementó conforme aumentaron los niveles de nitrógeno en el suelo; también que el incremento de N en la solución nutritiva generó un incremento de este elemento en los tejidos de individuos de *Carnegiea gigantea*, *Ferocactus acanthoides* y *Trichocereus chilensis* cultivados en hidroponía. Por otro lado, Gallegos-Vázquez *et al.* (2000) señalan que la absorción de nitrógeno por las raíces de *O. ficus-indica* presentó una relación estrecha con la concentración de este elemento en la solución nutritiva. Así, la disposición amplia de nutrimentos y en particular de nitrógeno, que proporciona la hidroponía, explica el contenido alto de PC encontrado en los cladodios.

Para el contenido de PC, el factor estadio de crecimiento fue significativo ($p < 0.05$), pero no el factor especie ni la interacción entre ambos factores (Cuadro 3). Estos resultados contrastan con los datos de Santos *et al.* (1990) y de Gregory y Felker (1992), quienes encontraron variaciones del contenido de PC en cladodios de nopal producidos en suelo, las cuales se atribuyeron a la especie o cultivar. Es posible que las diferencias en la capacidad de absorción de N entre los cultivares sólo se manifieste en el suelo, pero es más probable que las diferencias entre variantes de los trabajos citados fueran debidas a diferencias de madurez.

Los estadios de crecimiento EC1 y EC2 presentaron el mayor contenido de PC, con valores estadísticamente similares entre sí, pero mayores ($p < 0.05$) que los de EC3 y EC4 (Figura 4). Gregory y Felker (1992) también encontraron que el contenido de PC de cultivares de *Opuntia* y *Nopalea*, disminuyó en relación con la edad. Así, en el nopal como en cualquier otro forraje el contenido de proteína disminuye con la edad (Nefzaoui y Ben Salem, 2001; Collins y Fritz, 2003). La diferencia del contenido de PC entre estadios de crecimiento puede explicarse por la mayor actividad metabólica de los cladodios jóvenes. Nobel (1983) encontró mayores niveles de nitrógeno y de acumulación ácida nocturna, en cladodios jóvenes de *O. ficus-indica* que en los cladodios maduros; además, que a mayor concentración de nitrógeno en el clorénquima, es mayor la acumulación ácida nocturna. Por otro lado, Quesada y Valpuesta (2000) mencionan que los procesos de senescencia (no necesariamente de degradación) pueden estar presentes en diferentes etapas del desarrollo de las plantas. Al respecto, Thomas y Stoddart (1980) señalan que los diferentes órganos de una planta

desarrollada compiten entre sí por nutrientes y que esta competencia puede inducir procesos de senescencia. Durante estos procesos, los nutrientes de los tejidos que envejecen se transponen a los que están en crecimiento. Así, el cloroplasto que contiene el 70% de las proteínas de los tejidos fotosintéticos, se degrada y los aminoácidos liberados por las reacciones catabólicas se transponen en otras partes de la planta (Quesada y Valpuesta, 2000). Lo anterior, indica una diferenciación parcial de las funciones de los cladodios de nopal, pues los más jóvenes participan principalmente en la asimilación, mientras que los maduros tienden a realizar además funciones de soporte y almacenamiento de agua. El extremo de este proceso se puede observar en plantas adultas de nopal (*Opuntia* y *Nopalea*) cuyo tallo principal está fuertemente lignificado y sin clorofila.

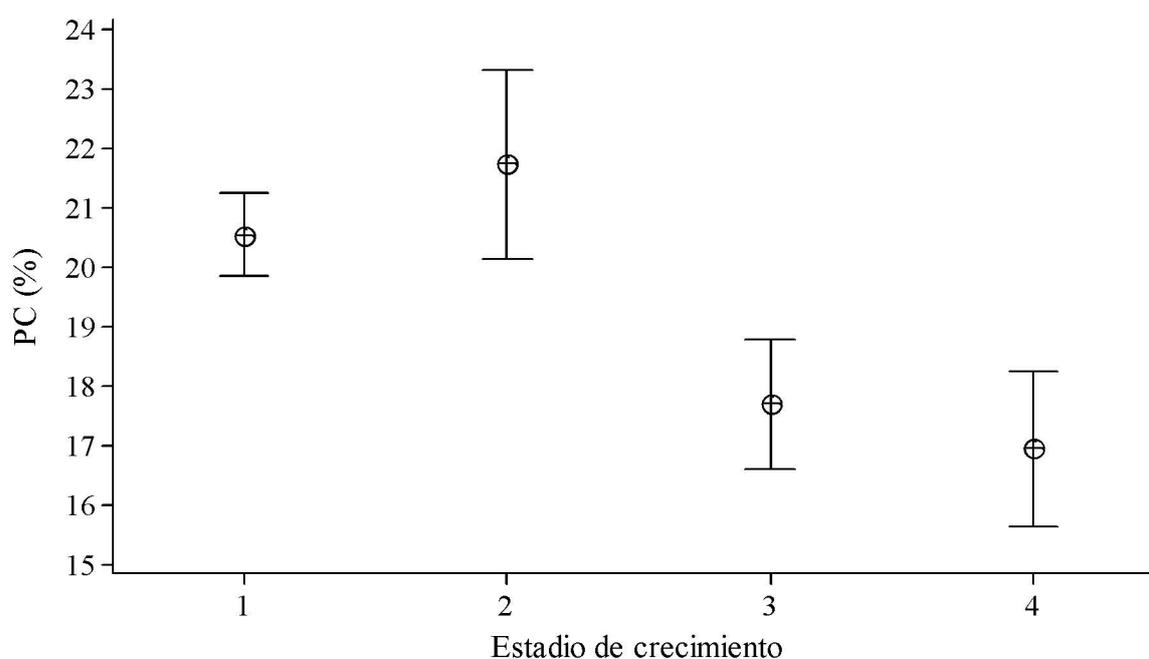


Figura 4. Efecto de la madurez en el contenido de proteína de cladodios de *Opuntia* spp. y *Nopalea* sp., producidos en hidroponía. Las barras indican el error estándar.

Fibra insoluble en detergente neutro y en detergente ácido

Los valores medios de FDN y FDA fueron 29.5 % \pm 8.5 y 16.3 % \pm 2.7, respectivamente. Estos contenidos de fibra son mayores que los encontrados en nopal desarrollado en suelo (Pinos-Rodríguez *et al.*, 2003). Nobel (1983) señala que el incremento

de nutrimentos, sobre todo de nitrógeno, incrementa la actividad metabólica de los nopales. Así, la mayor cantidad de fibra de los cladodios producidos en hidroponía puede explicarse por el “aceleramiento” de sus procesos fisiológicos. En efecto, Sánchez y Escalante (1983) indican que los cultivos hidropónicos manifiestan una precocidad alta, lo cual permite obtener varias cosechas al año.

Los contenidos de FDN y FDA fueron diferentes ($p < 0.01$) entre especies y estadios de crecimiento, pero la interacción entre estos factores no fue estadísticamente significativa (Cuadro 3). El contenido de FDN de *O. ficus-indica*, fue superior ($p < 0.01$) al de *O. undulata* x *O. tomentosa* y *N. cochenillifera*, pero similar al de *O. robusta* ssp. *larreyi* (Figura 5). *O. ficus-indica* presentó también el mayor contenido de FDA; estadísticamente similar al de *O. undulata* x *O. tomentosa*, dicho contenido fue diferente ($p < 0.01$) al de *O. robusta* ssp. *larreyi* y *N. cochenillifera*. Estos últimos presentaron el menor contenido de FDA, sin diferencias estadísticas con el de *O. undulata* x *O. tomentosa* (Figura 6). Estos resultados sugieren cierta persistencia de las diferencias entre especies para acumular polisacáridos estructurales (FDN y FDA) en ausencia de estrés ambiental. Las diferencias en el contenido de fibra explican también la variación en el contenido de MS señalada anteriormente. Las diferencias entre genotipos se han encontrado incluso en nivel anatómico. Por ejemplo, López *et al.* (1997) descubrieron diferencias en el grosor del colénquima entre las variantes Tricolor (16 mm) y Subarmata (42.5 mm) de la especie *O. lindheimeri*. Por su parte, Silva *et al.* (2001) estimaron la superficie de paredes celulares expuestas al intercambio gaseoso por unidad de tejido fotosintético (relación A^{mes}/A), parámetro relacionado estrechamente con la actividad fotosintética, y encontraron diferencias significativas entre variantes de nopal. Así, valores distintos en la relación A^{mes}/A indican acumulación diferente de tejido estructural y por lo tanto, valores diferentes de fibra.

Con excepción de *O. robusta* ssp. *larreyi*, el resto de las especies evaluadas presentaron proporciones similares de FDN y FDA. El menor contenido de FDA de *O. robusta* ssp. *larreyi* indicaría mayor calidad forrajera, al presentar probablemente menos lignina (Figuras 5 y 6). Duque (2003) sugiere que la disminución en la desaparición ruminal *in vitro* de la MS asociada a la edad de los cladodios de nopal, probablemente se debió al incremento de FDA y encontró que en comparación con *O. ficus-indica* y *O. rastrera*, la MS de *O. robusta* presentó mayor desaparición.

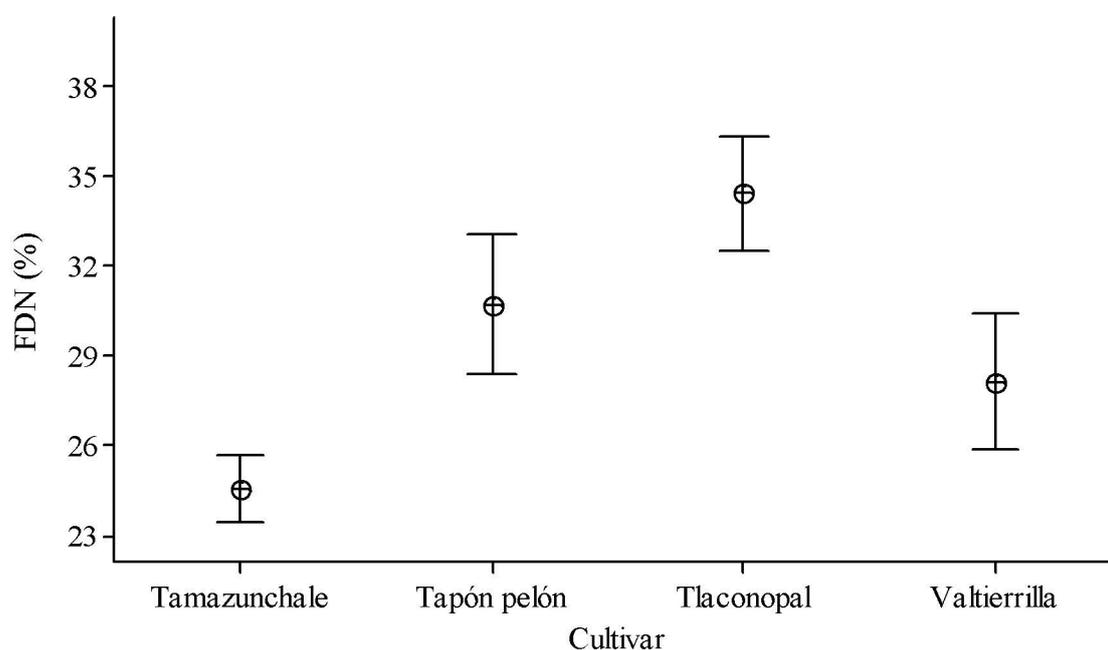


Figura 5. Contenido de fibra insoluble en detergente neutro de cladodios de cuatro especies de nopal, producidos en hidroponía. (Tamazunchale, *N. cochenillifera*; Tapón pelón, *O. robusta* ssp. *larreyi*; Tlaconopal, *O. ficus-indica* y Valtierrilla, *O. undulata* x *O. tomentosa*). Las barras indican el error estándar.

El estadio de crecimiento con mayor FDN fue EC4, con diferencias significativas respecto a EC2 y EC3 (Figura 7). De manera similar, la mayor FDA se encontró en el EC4 (Figura 8); en este caso, su valor fue mayor ($p < 0.01$) que el de EC1 y EC2, pero similar que el del EC3. El menor contenido de FDN y de FDA se encontró en EC2 y EC3 (Figura 7) y EC1 y EC2 (Figura 8), respectivamente. El incremento tanto de FDN como de FDA con la maduración de los vegetales es un proceso común (de Alba, 1971; Collins y Fritz, 2003). Lo anterior debido a que con el desarrollo de la célula, la pared celular se va depositando como una serie de capas en el siguiente orden: lámina media, pared primaria y pared secundaria; esta última provee de rigidez a la célula y se deposita cuando termina el crecimiento celular (Maynard *et al.*, 1981; Revilla y Zarra, 2000). La celulosa, la hemicelulosa y la lignina se encuentran en las paredes celulares primaria y secundaria; sin embargo, la proporción de las últimas dos en la pared secundaria, es mayor (Maynard *et al.*, 1981); por lo que se asocian con

la maduración. Collins y Fritz (2003) señalan que con este proceso la celulosa queda atrapada en una matriz de hemicelulosa y lignina. Los procesos fisiológicos que inician la síntesis de lignina aún son poco conocidos; sin embargo, se ha encontrado que una cantidad masiva de carbono metabolizado es convertida en lignina por la vía del ácido shikímico. La enzima fenilalanina amonialiasa tiene una función importante en esta ruta metabólica. La actividad de esta enzima es afectada por diversos factores dentro de los que se encuentra el estado de desarrollo de la planta. La ruta del metabolismo del ácido shikímico es de importancia básica en la síntesis de diversos metabolitos importantes como son los materiales estructurales de las plantas (Bidwell, 1979). Lo anterior explica los resultados de Peña-Valdivia y Sánchez-Urdaneta (2004), quienes señalan la ausencia de lignina en cladodios jóvenes de *Opuntia* y *Nopalea* (nopalitos de 20 cm de longitud).

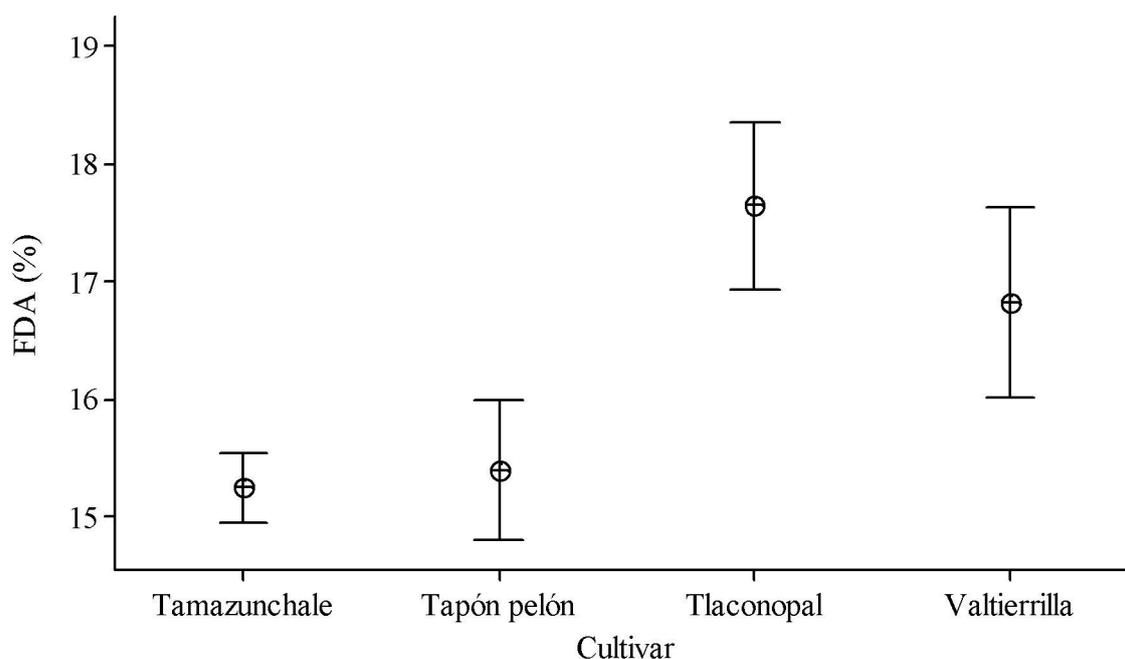


Figura 6. Contenido de fibra insoluble en detergente ácido de cladodios de cuatro especies de nopal, producidos en hidroponía. (Tamazunchale, *N. cochenillifera*; Tapón pelón, *O. robusta* ssp. *larreyi*; Tlaconopal, *O. ficus-indica* y Valtierra, *O. undulata* x *O. tomentosa*). Las barras indican el error estándar.

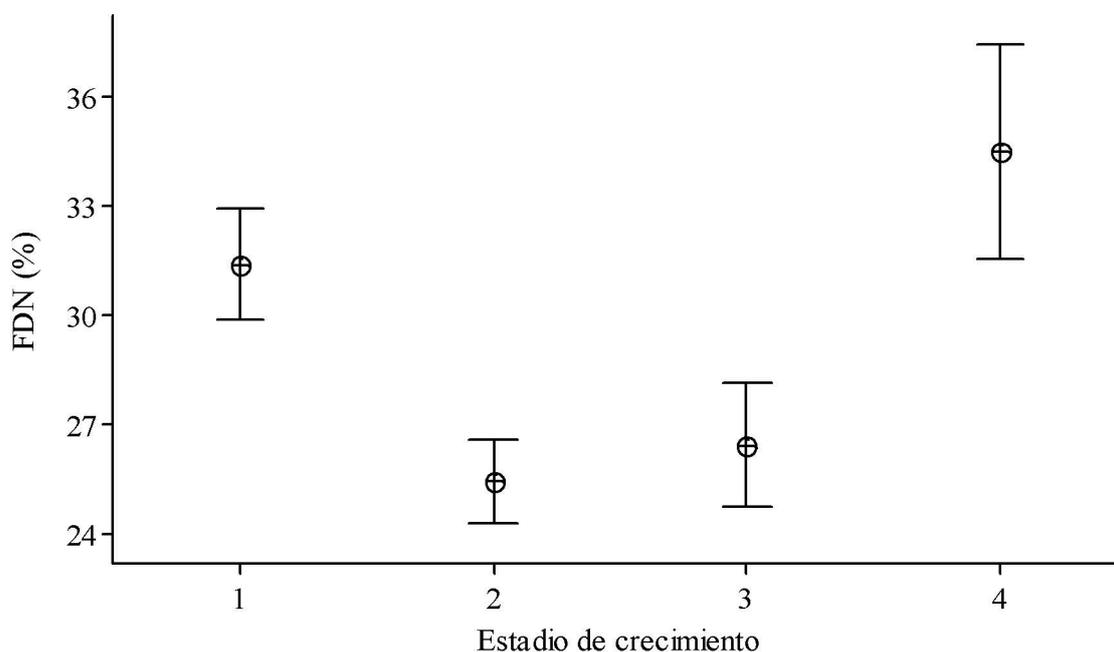


Figura 7. Efecto de la madurez en el contenido de fibra insoluble en detergente neutro de cladodios de *Opuntia* spp. y *Nopalea* sp., producidos en hidroponía. Las barras indican el error estándar.

En todas las especies se presentó un contenido elevado de FDN en el estadio de crecimiento 1 (Figura 7 y Cuadro 3). Rodríguez-Félix y Cantwell (1988) evaluaron cladodios de nopal producidos en suelo, en seis estadios de crecimiento y encontraron resultados similares en el contenido de humedad y fibra cruda. Estos autores mencionan que el decremento de fibra durante el crecimiento del cladodio puede deberse al aumento de la proporción parénquima/clorénquima y a la disminución del contenido de mucílago. Ramírez-Tobías *et al.* (2005) señalan que la proporción área/volumen es mayor en cladodios del EC1 que en los del EC2. Lo cual indicaría que el crecimiento inicial de los cladodios es principalmente en estructura y posteriormente en volumen.

Duque (2003) encontró que el contenido de FDN se correlacionó de manera negativa y significativa con la desaparición ruminal *in vitro* de la MS. Al respecto, Maynard *et al.* (1981) señalan que la disponibilidad nutricional de la hemicelulosa y de la celulosa es menor cuando su grado de lignificación es elevado; por lo que la lignina es un indicador de la calidad de los forrajes (de Alba, 1971). Por otro lado, con base en los resultados de Peña-Valdivia y

Sánchez-Urdaneta (2004), es probable inferir que los cladodios de *O. undulata* x *O. tomentosa*, *O. ficus-indica* y *O. robusta* ssp. *larreyi*, de los EC1 y EC2, y los de *N. cochenillifera* de los EC1, EC2 y EC3 carezcan de lignina y que su digestibilidad sea alta. Además, Nefzaoui y Ben-Salem (2001) señalan valores de lignina de 2.9 a 4.8 % en cinco especies de *Opuntia*, valores bajos en comparación con el 7.9 % que presentó la alfalfa. Con base en lo anterior, podría esperarse que aún la digestibilidad de los cladodios maduros (EC3 y EC4) sea alta. De hecho, la digestibilidad de los cladodios de *Opuntia* es mayor que la del heno de alfalfa (Shoop *et al.*, 1977). Hare (1908) citado por Flores y Aguirre (1979) señalan que cladodios de nopal producidos en suelo presentaron 64.9 % de digestibilidad de la MS. Por su parte, Mondragón-Jacobo *et al.* (2001) encontraron valores de digestibilidad de la MS de 84 a 95 % en nopales producidos en hidroponía. Así, es probable que el incremento del contenido de fibra registrado involucre principalmente a celulosa y hemicelulosa, y que su lignificación sea aún incipiente como para reducir su digestibilidad.

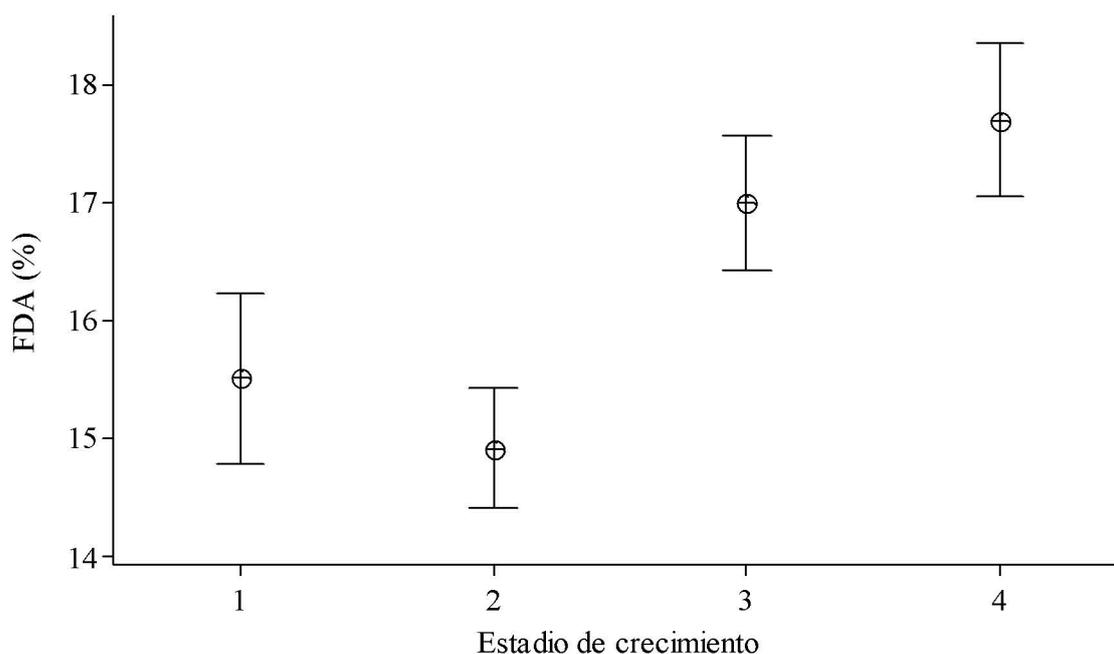


Figura 8. Efecto de la madurez en el contenido de fibra insoluble en detergente ácido de cladodios de *Opuntia* spp. y *Nopalea* sp., producidos en hidroponía. Las barras indican el error estándar.

Cenizas

El contenido medio de cenizas en la MS de los cladodios fue $29.4 \% \pm 3.5$, con un mínimo de 21.4 % y un máximo de 37.9 %. Estos valores son mayores que los presentados por Rodríguez-Félix y Cantwell (1988), quienes en nopal producido en suelo encontraron de 14.8 a 17.0 % de cenizas. Revuelta (1963) señala que la riqueza mineral del suelo generalmente incrementa el contenido de cenizas en las plantas. Así, es probable que la mayor disponibilidad de minerales en la solución hidropónica con respecto al suelo, explique el mayor contenido de cenizas que presentaron los cladodios producidos en hidroponía.

El análisis estadístico señala diferencias ($p < 0.001$) debidas a los estadios de crecimiento pero no a las especies, aunque la interacción especie*estadio de crecimiento sí fue significativa ($p < 0.05$) (Cuadro 3). EC3 y EC4 presentaron mayores cantidades de cenizas; estos valores fueron estadísticamente similares, pero mayores ($p < 0.001$) que los registrados para EC1 y EC2. EC1 presentó 26.4 % de cenizas, porcentaje estadísticamente menor que el de los otros estadios de crecimiento (Figura 9). De manera similar, Flores *et al.* (1995) encontraron que el contenido de cenizas fue mayor en cladodios de mayor edad.

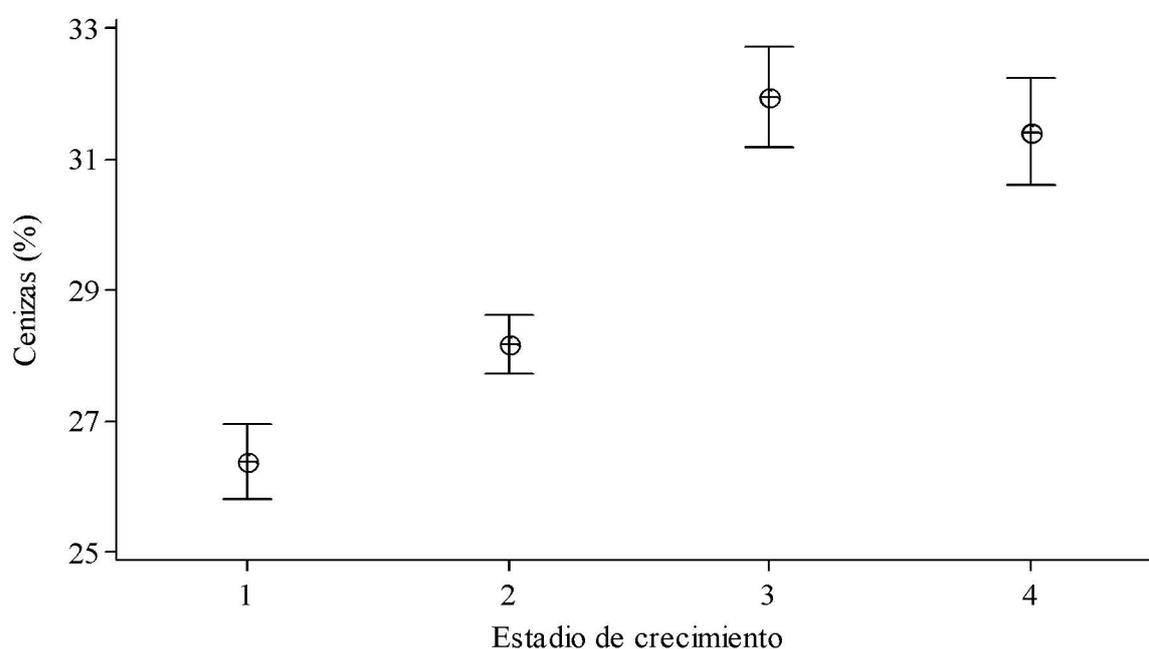


Figura 9. Efecto de la madurez en el contenido de cenizas de cladodios de *Opuntia* spp. y *Nopalea* sp., producidos en hidroponía. Las barras indican el error estándar.

De Alba (1971) menciona que el término cenizas es sinónimo de minerales. En nopal producido en suelo (Bravo, 1978) y en hidroponía (Mondragón-Jacobo *et al.*, 2001), el K junto con el Ca son los minerales más abundantes. El K por su solubilidad, se redistribuye con facilidad de los órganos y tejidos maduros a los juveniles (Gárate y Bonilla, 2000). Por otro lado, el Ca es un elemento poco móvil, por lo que se acumula en los tejidos “viejos” o maduros (Epstein, 1972; citado por Nobel, 1983), lo que explica el mayor contenido de cenizas en EC4. Además, Nobel (1983) encontró que los cladodios de dos años de edad presentaron mayor cantidad de Ca que los de dos semanas, y que el K presentó una tendencia inversa. A pesar de que el nopal es rico en Ca, la forma química como se encuentra (cristales de oxalato de calcio) reduce su disponibilidad. Así, de un contenido de calcio de $18.1 \pm 1.6 \text{ mg g}^{-1}$ en la MS, sólo $11.0 \pm 1.5 \text{ mg g}^{-1}$ es Ca aprovechable por los humanos o animales. Aun así, el nopal es una fuente aceptable de Ca (Mcconn y Nakata, 2004).

El contenido de minerales en las plantas depende de factores diversos, como la especie vegetal, la disponibilidad de nutrimentos del suelo y la edad fisiológica, aunque algunos de estos factores tienen mayor influencia que otros (Gárate y Bonilla, 2000). Así, en la medida que estos factores se manipulen es posible que el contenido de minerales se modifique. Con la hidroponía se logran controlar algunos factores agronómicos de la producción, como la nutrición, la aireación, etc. Lo anterior, permite que los productos hidropónicos sean más uniformes que aquellos producidos en suelo (Sánchez y Escalante, 1983). En relación con lo anterior, en esta investigación el efecto de la especie sobre el contenido de cenizas fue nulo y sólo se encontró efecto del estadio de crecimiento del cladodio. Así, la disponibilidad uniforme de nutrimentos generó un contenido de cenizas homogéneo entre especies.

Flores *et al.* (1995) encontraron que el contenido de cenizas en cladodios de edades distintas fue diferente en algunos cultivares, lo que coincide con lo encontrado en este trabajo. Así, en el EC4 el mayor contenido de cenizas se encontró en *O. ficus-indica* y *N. cochenillifera*, sin diferencias estadísticas entre ambos. A la vez, los contenidos menores de cenizas en el EC4 se presentaron en *O. undulata* x *O. tomentosa* y *O. robusta* ssp. *larreyi*, sin diferencia estadística entre sí, ni con *N. cochenillifera*, pero sí con *O. ficus-indica* ($p < 0.05$). En el EC3, *N. cochenillifera* presentó menos ($p < 0.05$) cenizas que *O. ficus-indica* y *O. robusta* ssp. *larreyi*, pero igual que *O. undulata* x *O. tomentosa*. El contenido de cenizas en el EC2, fue estadísticamente similar en las cuatro especies. En el EC1, *N. cochenillifera*, *O. robusta*

ssp. *larreyi* y *O. undulata* x *O. tomentosa* presentaron un contenido de cenizas estadísticamente similar pero mayor ($p < 0.01$) que el presentado por *O. ficus-indica* (Figura 10).

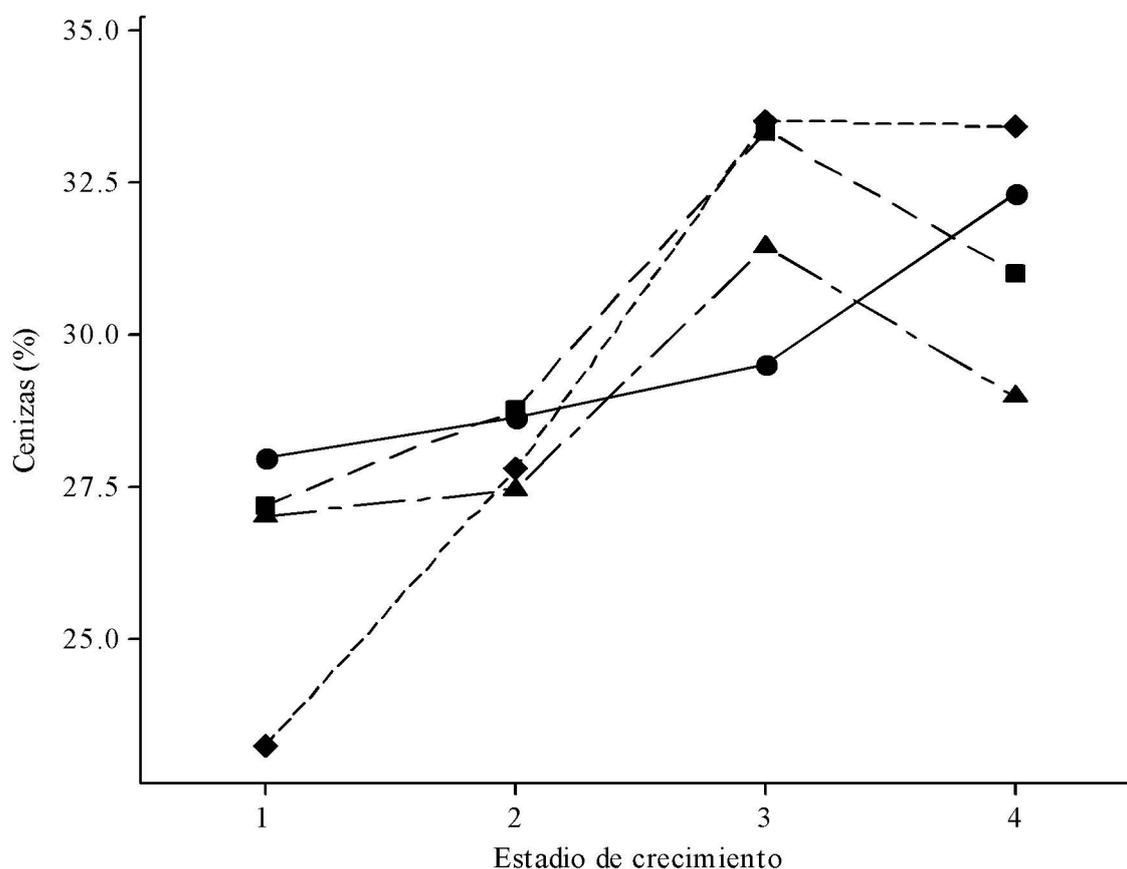


Figura 10. Contenido de cenizas en cladodios (*Opuntia* y *Nopalea*) de cuatro estadios de crecimiento producidos en hidroponía. (—●— *N. cochenillifera*, —■— *O. robusta* ssp. *larreyi*, -◆- *O. ficus-indica* y —▲— *O. undulata* x *O. tomentosa*)

Duque (2003) encontró que la digestibilidad de la MS de cladodios de nopal se correlacionó negativamente con el contenido de cenizas. Es probable que lo anterior fuera debido a que las cenizas incluyen minerales inútiles para los animales, como la sílice, lo cual resta valor a los forrajes (de Alba, 1971). Gutiérrez y Bernal (2004) sugieren que la alimentación del ganado con base en nopal, se reduzca a periodos cortos (dos o tres meses),

pues su contenido alto de cenizas puede generar desequilibrios de minerales, como deficiencias, antagonismos o intoxicaciones. No obstante, también es importante considerar todos los minerales que contienen las cenizas del nopal. Al respecto, Mondragón-Jacobo *et al.* (2001) mencionan que los cladodios de nopal producidos en hidroponía pueden cubrir las necesidades de Ca, P, K y Zn para mantenimiento y producción del ganado.

CONCLUSIONES

El contenido de humedad de los cladodios de nopal producidos en hidroponía fue alto. El mayor porcentaje de materia seca lo presentó *N. cochenillifera* y el menor *O. robusta* ssp. *larreyi*. El contenido de MS varió en relación con el estadio de crecimiento, pero de manera distinta para cada especie.

La materia seca del nopal producido en hidroponía presentó un contenido medio de PC elevado y similar en las cuatro especies. El mayor contenido de PC se encontró en EC1 y EC2, y se redujo en relación con el crecimiento.

La mayor cantidad de FDN y FDA la presentó *O. ficus-indica*, la menor *N. cochenillifera*, *O. undulata* x *O. tomentosa* presentó contenidos intermedios. *O. robusta* ssp. *larreyi* destacó por su contenido alto de FDN, pero bajo de FDA. Los estadios de crecimiento 1 y 4 presentaron el mayor contenido de FDN. El contenido de FDA se incrementó con el crecimiento.

El contenido de cenizas del nopal aumentó con el crecimiento de los cladodios y fue similar entre especies. Sin embargo, la tasa de incremento varió entre especies.

En general, los cladodios con las mejores características nutrimentales fueron los de *N. cochenillifera* independientemente del estadio de crecimiento. La mayor calidad forrajera la presentaron los EC1 y EC2, independientemente de la especie.

La producción en hidroponía sí incrementa el contenido nutrimental de los cladodios de *Opuntia* y *Nopalea*.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero otorgado inicialmente por el Fondo de Apoyo a la Investigación de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí mediante el convenio CO4-FAI-04-37.37; y posteriormente por la Comisión Nacional de las Zonas Áridas y la Fundación Produce San Luis Potosí, A.C. Se agradece al grupo de productores “Luchadores de San José de la Peña” su apoyo y la disponibilidad de su infraestructura. El primer autor agradece al CONACYT la beca Núm. 181453 otorgada para realizar sus estudios de maestría.

LITERATURA CITADA

- Anónimo. 1970. Carta de climas, San Luis Potosí. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. México, D.F. México.
- Anónimo. 1976. Carta topográfica, Villa de Guadalupe (F-14-A34). Comisión de Estudios del Territorio Nacional. México, D.F. México.
- Anónimo. 1990a. Official Methods of Analysis. 15th ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington, D.C. USA. 1298 p.
- Anónimo. 1990b. User's Guide: Statistics. SAS Inst. Inc. Cary, North Caroline. USA. 1028 p.
- Anónimo. 1992. Atlas Nacional de México; Carta IV 4.5, temperaturas extremas. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. México.
- Belasco, I.J.; M.F. Gribbins; D.W. Kolterman. 1958. The response of rumen microorganisms to pasture grasses and prickly pear cactus following foliar application of urea. *Journal of Animal Science*. 17: 209-217.
- Bidwell, R.G.S. 1979. Fisiología vegetal. AGT. México, D.F. México. 784 p.
- Bravo H., H. 1978. Las cactáceas de México. 2^a ed. Vol. 1. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. México. 735 p.
- Calderón P., N. 1995. Efecto de la salinidad en la producción de materia seca y absorción nutrimental de plantas micropropagadas de nopal (*Opuntia* spp.). Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México. 96 p.
- Collins, M.; J.O. Fritz. 2003. Forage quality. In: R.F. Barnes; C. J. Nelson; M. Collins; K. J. Moore (Eds.). Forages. 6th ed. Iowa State Press. Ames, Iowa. USA. pp. 363-390.

- De Alba, J. 1971. Alimentación del ganado en América Latina. 2ª ed. La Prensa Médica Mexicana. México, D.F. México. 475 p.
- Duque B., R. 2003. Valoración nutricional del nopal forrajero para rumiantes. Tesis profesional. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, SLP. México. 24 p.
- Flores H., A.; M. Murillo S.; F. Borrego E.; J.L. Rodríguez O. 1995. Variación de la composición química en estratos de la planta de 20 variedades de nopal. En: E. Pimienta B.; C. Neri L.; A. Muñoz V.; E.M. Huerta M. (Eds.). Memoria del VI Congreso Nacional y IV Congreso Internacional Sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México. pp. 110-115.
- Flores V., C.A.; J.R. Aguirre R. 1979. El nopal como forraje. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México. 80 p.
- Gallegos-Vázquez, C.; E. Olivares-Sáenz; R. Vázquez-Alvarado; F. Zavala-García. 2000. Absorción de nitrato y amonio por plantas de nopal en hidroponía. Terra. 18: 133-139.
- Gárate, A.; I. Bonilla. 2000. Nutrición mineral y producción vegetal. En: J. Azcón-Bieto; M. Talón (Eds.). Fundamentos de fisiología vegetal. Mc. Graw Hill. Madrid, España. pp. 113-130.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 4ª ed. Editado por la autora. México, D.F. México. 218 p.
- Gibson, A.C.; P.S. Nobel. 1986. The cactus primer. Harvard University Press. Cambridge, Massachusetts. USA. 286 p.
- Goering, H.D.; P.J. van Soest. 1970. Forage fiber analyses (apparatus, reagents, procedures, and some applications). Agricultural Handbook No. 379. United States Department Agriculture. Washington, D.C. USA. 20 p.
- Goldstein, G.; J.L. Andrade; P.S. Nobel. 1991. Differences in water relations parameters from the chlorenchyma and the parenchyma of the *Opuntia ficus-indica* under wet versus dry conditions. Australian Journal of Plant Physiology. 18: 95-107.
- Gonzaga de A., S.; D. Cordeiro dos S. 2005. Palma forrageira. Em: L.H. Piedade; E. Assis (Eds.). Espécies vegetais exóticas com potencialidades para semi-árido brasileiro. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Brasília, D.F. Brasil. pp. 91-127.

- Gonzalez, C.L. 1989. Potential of fertilization to improve nutritive value of prickly pear cactus (*Opuntia lindheimerii* Engelm.). *Journal of Arid Environments*. 16: 87-94.
- Gregory, R.A. y P. Felker. 1992. Crude protein and phosphorus contents of eight contrasting *Opuntia* forage clones. *Journal of Arid Environments*. 22: 323-331.
- Gutiérrez O., E.; H. Bernal B. 2004. Uso del nopal en la nutrición animal. En: C. Flores V. (Ed.). *Memoria del X Congreso Nacional y VII Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, y del Fifth International Congress on Cactus Pear and Cochineal*. Universidad Autónoma Chapingo, Food and Agriculture Organization e International Society for Horticultural Science. Chapingo, Estado de México. México. Edición en disco compacto.
- López-Ramos, E. 1993. *Geología general y de México*. 7ª ed. Trillas. México, D.F. México. 288 p.
- López D., M.; A. López J.; C. Pérez M.; P. Cruz H. 1992. Respuesta del nopal (*Opuntia ficus-indica*) a la fertilización de N,P,K mediante aspersion de los cladodios. En: I. Salazar S.; S. López D. (Eds.). *Memoria del V Congreso Nacional y III Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal*. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México. p. 32.
- López G., J.J.; E. Pimienta B.; A. Muñoz A.; M. Rivera R.; J.M. Fuentes. 1997. Evaluación anatómica del nopal (*Opuntia* spp.) en Saltillo, Coahuila, México. En: A. Vázquez; C. Gallegos V.; N.E. Treviño H.; Y. Días T. (Eds.). *Memoria del VII Congreso Nacional y V Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal*. Universidad Autónoma de Nuevo León. Monterrey, N.L. México. pp. 121-122.
- López-García, J.J., J.M. Fuentes-Rodríguez; A. Rodríguez-Gámez. 2001. Production and use of *Opuntia* as forage in northern of México. In: C. Mondragón-Jacobo; S. Pérez-González (Eds.). *Cactus (Opuntia spp.) as forage*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. pp. 29-36.
- Maynard, L.A.; J.K. Loosli; H.F. Hintz; R.G. Warner. 1981. *Nutrición animal*. 4ª ed. Mc Graw Hill. México, D.F. México. 640 p.
- Mcconn, M.M.; P.A. Nakata. 2004. Oxalate reduces calcium availability in the pads of the prickly pear cactus through formation of calcium oxalate crystals. *Journal of Agricultural Food and Chemistry*. 52: 1371-1374.

- Mondragón-Jacobo, C.; S. de J. Méndez-Gallegos; G. Olmos-Oropeza. 2001. Cultivation of *Opuntia* for fodder production: from re-vegetation to hydroponics. In: C. Mondragón-Jacobo; S. Pérez-González (Eds.). Cactus (*Opuntia* spp.) as forage. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. pp. 107-122.
- Nefzaoui, A.; H. Ben Salem. 2001. *Opuntia* spp., a strategic fodder and efficient tool to combat desertification in the WANA region. In: C. Mondragón-Jacobo; S. Pérez-González (Eds.). Cactus (*Opuntia* spp.) as forage. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. pp. 73-90.
- Nobel, P.S. 1983. Nutrient levels in cacti – relation to nocturnal acid accumulation and growth. American Journal of Botany. 70: 1244-1253.
- Nobel, P.S. 1998. Los incomparables agaves y cactus. Trillas. México, D.F. México. 211 p.
- Nobel, P.S. 2001. Ecophysiology of *Opuntia ficus-indica*. In: C. Mondragón-Jacobo; S. Pérez-González (Eds.). Cactus (*Opuntia* spp.) as forage. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. pp. 13-20.
- Nobel, P.S.; C.E. Russell; P. Felker; J. Galo M.; E. Acuña. 1987. Nutrient relations and productivity of prickly pear cacti. Agronomy Journal. 79: 550-555.
- Olmos O., G.; S. de J. Méndez G.; J. Martínez H. 1999. Evaluación de 29 cultivares de nopal para producción de forraje en hidroponía. En: J.R. Aguirre R. y J.A. Reyes A. (Eds.). Memoria del VIII Congreso Nacional y VI Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, SLP. México. pp. 105-106.
- Peña-Valdivia, C.B.; A.B. Sánchez-Urdaneta. 2004. Polisacáridos de nopalito y tuna. En: C. Flores V. (Ed.). Memoria del X Congreso Nacional y VII Internacional, Sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal y del Fifth International Congress on Cactus Pear and Cochineal. Universidad Autónoma Chapingo, Food and Agriculture Organization e International Society for Horticultural Science. Chapingo, Estado de México. México. Edición en disco compacto.
- Pinos-Rodríguez, J.M.; R. Duque-Briones; J.A. Reyes-Agüero, J.R. Aguirre-Rivera. y S.S. González-Muñoz. 2003. Contenido de nutrientes en tres especies de nopal forrajero. En: G. Esparza F.; M.A. Sálas L.; J. Mena C.; R.D. Valdez C. (Eds.). Memoria del IX Congreso Nacional y VII Congreso Internacional sobre Conocimiento y

- Aprovechamiento del Nopal. Universidad Autónoma Chapingo, Universidad Autónoma de Zacatecas e Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Zacatecas, Zac. México. pp. 60-63.
- Quesada M., A.; V. Valpuesta. 2000. Juvenilidad, senescencia y abscisión. En: J. Azcón-Bieto; M. Talón (Eds.). Fundamentos de fisiología vegetal. Mc. Graw Hill. Madrid, España. pp. 451-464.
- Ramírez-Tobías, H.M.; J.R. Aguirre-Rivera; J.A. Reyes-Agüero; J.M. Pinos-Rodríguez. 2005. Datos no publicados. Instituto de Investigación de Zonas Desérticas, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, S.L.P. México.
- Revilla, G.; I. Zarra. 2000. La fisiología vegetal y su impacto social. La célula vegetal. En: J. Azcón-Bieto; M. Talón (Eds.). Fundamentos de fisiología vegetal. Mc. Graw Hill. Madrid, España. pp. 1-16.
- Revuelta G., L. 1963. Bromatología zootécnica y alimentación animal. 2ª ed. Salvat. Madrid, España. 1044 p.
- Rodríguez-Félix, A.; M. Cantwell. 1988. Developmental changes in composition and quality of prickly pear cactus cladodes (nopalitos). *Plant Foods for Human Nutrition*. 38: 83-93.
- Sánchez del C., F.; E.R. Escalante R. 1983. Hidroponía. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México. 194 p.
- Santos M., V.F. dos.; M. de A. Lira.; I. Farias.; H. de A. Burity.; D.C. dos Santos; J.J. Tavares F. 1990. Estudo do comportamento das cultivares de palma forrageira gigante, redonda (*Opuntia ficus-indica*) e miúda (*Nopalea cochenillifera*) na produção de leite. *Revista da Sociedade Brasileira da Zootecnia*. 19: 504-511.
- Shoop, M.C.; E.J. Alford; H.F. Mayland. 1977. Plains prickly pear is good for cattle. *Journal of Range Management*. 30: 12-17.
- Silva, H.; E. Acevedo; P. Silva. 2001. Anatomía del tejido fotosintético de diez taxa de *Opuntia* establecidos en el secano árido mediterráneo de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*. 74: 341-357.
- Thomas, H.; J.L. Stoddart. 1980. Leaf senescence. *Annual review of plant physiology*. 34: 81-111.

Trachtenberg, S.; A.M. Meyer. 1981. Composition and properties of *O. ficus-indica* mucilage. *Phytochemistry*. 20: 2665-2668.

II Productividad de *Opuntia* spp. y *Nopalea* sp. en hidroponía y su relación con la temperatura

II Productividad de *Opuntia* spp. y *Nopalea* sp. en hidroponía y su relación con la temperatura

Hugo Magdaleno Ramírez Tobías¹, Juan Rogelio Aguirre Rivera², Juan Antonio Reyes Agüero², Juan Manuel Pinos Rodríguez²

¹ Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales, Área de Recursos Naturales Renovables. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí. México. e-mail. rthugo@yahoo.com

² Instituto de Investigación de Zonas Desérticas y Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Altair Núm. 200 Fracc. Del Llano. 78377 San Luis Potosí, S.L.P. México.

RESUMEN

El objetivo de esta investigación fue evaluar la productividad de nopales (para producción de nopalito y forraje) de procedencias climáticas distintas, en hidroponía bajo invernadero, además de explorar el efecto de la temperatura del aire. Se utilizaron cuatro especies de nopal (*Nopalea cochenillifera*, *Opuntia ficus-indica*, *O. robusta* ssp. *larreyi* y *O. undulata* x *O. tomentosa*). Los cladodios se cosecharon en cuatro estadios de crecimiento, desde nopalito tierno (EC1) hasta cladodio desarrollado (EC4), con dos estadios intermedios (EC2 y EC3). La productividad se determinó dividiendo la producción total de los días transcurridos desde la brotación hasta la última cosecha. Los datos de productividad de EC1 se correlacionaron con los de la temperatura (media de máximas, de mínimas y de medias) de los periodos entre cortes. La productividad del nopal se incrementó significativamente y en forma directa, con el tamaño del cladodio a la cosecha, pero a una tasa distinta entre especies. Como nopalito tierno (EC1), *O. robusta* ssp. *larreyi* y *O. undulata* x *O. tomentosa* fueron las especies más productivas; como nopalito maduro (EC2) la productividad de las tres especies de *Opuntia* fue similar y estadísticamente mayor que la de *N. cochenillifera*. Como forraje, las especies de *Opuntia* más productivas también fueron *O. robusta* ssp. *larreyi* y *O. undulata* x *O. tomentosa*, la menos productiva fue *O. ficus-indica*; en el EC4 la productividad de *O. undulata* x *O. tomentosa* (117.6 t de MS ha⁻¹ día⁻¹) fue estadísticamente la mayor. *O. robusta* ssp. *larreyi* se correlacionó ($r= 0.5307$; $p<0.001$ y $r=-0.4622$; $p<0.01$) con las temperaturas medias de máximas y de mínimas, respectivamente; *O. undulata* x *O. tomentosa* se correlacionó ($r= 0.3253$; $p<0.05$) con la media de la temperatura máxima.

INTRODUCCIÓN

La productividad vegetal refleja los efectos acumulativos de los factores que influyen sobre el crecimiento (Nobel, 1998). En general, en las zonas áridas y semiáridas dicha productividad es baja, debido a que la poca disponibilidad de agua limita el crecimiento vegetal (Fischer y Turner, 1978; Nobel, 1998). Estas zonas comprenden más de un tercio de la superficie de la tierra (White, 1961), y son importantes para la producción vegetal y animal (Fischer y Turner, 1978). En efecto, el estrés hídrico genera rendimientos bajos e inestabilidad en la producción de cosechas (Kanwar, 1978). Por otro lado, en los agostaderos la producción de forraje es pobre e irregular en el año y variable de un año a otro (Flores y Aguirre, 1979), lo que propicia productividades bajas en los sistemas de producción animal, principalmente por una alimentación deficiente (de Alba, 1971).

Los nopales están adaptados a condiciones áridas y son utilizados tradicionalmente como alimento humano y como forraje. En México, el aprovechamiento de los cladodios tiernos de nopal (nopalitos) data desde épocas prehispánicas (Anaya, 2001). En las zonas áridas se utilizan nopalitos de *Opuntia* (Anaya, 2001), mientras que en las zonas tropicales subhúmedas son de *Nopalea* (Sánchez, 1995). Se considera al nopalito como un alimento funcional, debido a que además de su aporte nutritivo, proporciona beneficios a la salud y a la prevención de enfermedades (Sáenz *et al.*, 2004). Por otro lado, Anaya (2001) señala que en México la importancia forrajera de los cladodios de *Opuntia* se manifestó desde la época de la Colonia, con la introducción de la ganadería. Actualmente, el forraje de *Opuntia* y *Nopalea* es de gran importancia en algunas regiones del mundo, sobre todo durante los periodos secos (Flores y Aguirre, 1979; Arruda *et al.*, 1999). Así, la utilización de los nopales para producir nopalito o forraje representa una alternativa con probabilidades altas de mejorar la producción vegetal en las zonas áridas.

Por su fisiología tipo MAC (metabolismo ácido de las crasuláceas), la eficiencia en el uso del agua de los nopales (*Opuntia* y *Nopalea*) es alta. Además, la productividad del nopal se relaciona de manera directa con las prácticas de manejo proporcionadas. El aporte de nutrimentos como estiércol, fertilizantes o ambos y de irrigación, incrementa la producción de cladodios, ya sea para nopalitos o para forraje (Flores, 2001; Gonzaga y Cordeiro, 2005). Nobel (1998) indica que cuando se le proporcionan condiciones óptimas, la productividad del

nopal es igual o mayor que la de cultivos como maíz, alfalfa, sorgo, etc. Tal es el caso de la hidroponía, con la cual es posible obtener hasta 450 t ha⁻¹ de forraje verde en seis meses (Mondragón *et al.*, 2001). A pesar de que la productividad del nopal se incrementa con las prácticas agronómicas de manejo, existen diferencias debidas a la especie y/o variante (Mondragón *et al.*, 2001; Cordeiro *et al.*, 2004). Es probable que tales diferencias indiquen la capacidad genética para producir biomasa y adaptarse. Por ejemplo, Cordeiro y Gonzaga (2001) señalan que *Nopalea* crece mejor que *Opuntia* en áreas más húmedas y menos frías. No obstante, *Opuntia* es más productiva en zonas más frescas y secas.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la productividad de cuatro especies de nopal de procedencias climáticas distintas, en condiciones de hidroponía y bajo invernadero, y explorar el efecto de la temperatura. Se evaluaron cladodios de nopal en cuatro estadios de crecimiento, cuyos tamaños corresponden a los utilizados tradicionalmente como nopalito y como forraje. Se postula que la productividad dependerá de la especie y del estadio de crecimiento a la cosecha.

MATERIALES Y MÉTODOS

El experimento se realizó en la comunidad San José de la Peña perteneciente al Municipio de Villa de Guadalupe, S.L.P., en un invernadero de techo curvo, con estructura de tubo galvanizado, forrado con materiales plásticos (polietileno y malla sombra, ésta última como segunda cubierta en el techo). La planta del invernadero tiene forma rectangular alineada longitudinalmente en dirección este-oeste; en una de sus cabeceras se encuentra un espacio oscuro donde se tiene el equipo y materiales requeridos. Las coordenadas geográficas y altitud del sitio son: 23° 15' 00'' Latitud Norte, 100° 45' 20'' Longitud Oeste y 1735 m (Anónimo, 1976). El clima corresponde a la fórmula climática BS₀hw'(e), clima seco semicálido con temperatura media anual entre 18 y 22 °C y temperatura media del mes más frío menor que 18 °C. Presenta un régimen de lluvias de verano con un periodo seco intermedio (canícula) e invierno fresco y seco. La temperatura mínima promedio anual oscila entre 8 y 12 °C y en enero este promedio desciende hasta 4 y 8 °C (Anónimo, 1970; García, 1988). Se considera un clima extremoso (Anónimo, 1992).

El medio hidropónico utilizado fue un sistema de cultivo en gravilla (Sánchez y Escalante, 1983), formado por cuatro unidades (bancales) de 1.8, 1.2 y 0.30 m de longitud, anchura y profundidad, respectivamente, una para cada bloque o repetición. La solución nutritiva se aplicó por subirrigación y se drenó por gravedad, para reciclarse a través de un sistema de recolección y conducción. Para facilitar el drenaje, los bancales presentaron una pendiente ligera y se colocaron en un nivel superior con respecto al depósito de la solución nutritiva. La gravilla fue de tezontle (basalto vesicular de color rojo, compuesto principalmente por dióxido de hierro y químicamente inerte; López-Ramos, 1993) con un diámetro promedio de partícula de 2 a 4 mm, el cual previamente se lavó con agua corriente y se desinfectó con una solución de cloro al 2% (Calderón, 1995).

Composición y manejo de la solución nutritiva

Se empleó una solución nutritiva utilizada en trabajos previos con plantas de nopal (Cuadro 4). El riego se suministró dos veces por día (9:00 y 13:00 h), cada tercer día (Olmos *et al.*, 1999). Antes de realizar el riego, el pH de la solución nutritiva se ajustó a 5.8 (Calderón, 1995). Las mermas en el volumen de la solución se restituyeron cuando fueron el 20% del volumen inicial, y toda la solución nutritiva se reemplazó cada 15 días (Sánchez y Escalante, 1983).

Cuadro 4. Composición de la solución nutritiva (Calderón, 1995; Gallegos-Vázquez *et al.*, 2000) y fórmula química de las sustancias utilizadas.

Elemento	Concentración mg L ⁻¹	Fuente
N	150.0	Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O
Ca	210.0	
P	40.0	KH ₂ PO ₄
K	225.0	K ₂ SO ₄
Mg	40.0	MgSO ₄ ·4H ₂ O
Fe	5.0	Kelato de Fe
Mn	2.0	MnSO ₄ ·4H ₂ O
Cu	0.1	CuSO ₄ ·5H ₂ O
Zn	0.2	ZnSO ₄ ·7H ₂ O
B	0.6	H ₃ BO ₃
Mo	0.05	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O

Material biológico

Las especies de nopal proceden de regiones climáticas distintas, son inermes y se utilizan para producir nopalitos principalmente para consumo humano y forraje. Tales especies fueron: 1) *Nopalea cochenillifera*, que proviene de regiones cálido húmedas; aunque esta adaptada a un clima extremo con oscilaciones de la temperatura media mensual de 7 a 14 °C, es la especie menos adaptada a temperaturas bajas. 2) *Opuntia undulata* x *O. tomentosa*, procede de lugares con clima de transición entre semicálido y templado, el más seco de los climas templados subhúmedos; está adaptada a un clima extremo, su amplitud de tolerancia térmica es grande. 3) *O. robusta* ssp. *larreyi*, se distribuye en zonas de clima semiseco templado con verano cálido y extremo; esta especie tolera temperaturas menores que cero en invierno, pero a su vez altas en verano; su amplitud de tolerancia térmica es grande y presenta afinidad por temperaturas frescas; además, su adaptación al clima seco sugiere que tolera oscilaciones amplias de temperatura diaria. 4) *O. ficus-indica*, procede de una región con clima templado subhúmedo con verano fresco y largo. Esta especie presenta la menor amplitud de tolerancia térmica, es decir la oscilación de la temperatura media anual es entre 5 y 7 °C. De las cuatro especies estudiadas, *O. ficus-indica* y *O. robusta* ssp. *larreyi* son los que toleran las temperaturas más bajas. (Cuadro 5).

Cuadro 5. Fórmula climática y temperaturas de las regiones de procedencia del material de *Opuntia* y *Nopalea* evaluado.

Especie	Fórmula climática	TMA	TMMF	TMMC
<i>N. cochenillifera</i>	$Aw_o(w)(e)w$	> 22	> 18	s.l.e.
<i>O. undulata</i> x <i>O. tomentosa</i>	$(A)Ca(w_o)(w)(e)g$	> 18	< 18	> 22
<i>O. robusta</i> ssp. <i>larreyi</i>	$BS_o kw(e)gw''$	12 a 18	- 3 a 18	> 18
<i>O. ficus-indica</i>	$Cb(w_1)(w)(i')g$	12 a 18	- 3 a 18	< 22

Datos de temperatura en grados centígrados y con base en García (1988). TMA, temperatura media anual; TMMF, temperatura media del mes más frío; TMMC, temperatura media del mes mas caliente; s.l.e., sin límite específico.

Plantación

Los cladodios de nopal usados como planta madre, se orearon previamente a temperatura ambiente, para que la zona de corte cicatrizara. Posteriormente, se sumergieron en una solución con desinfectante comercial. Para evitar la competencia entre las raíces, los cladodios se plantaron en macetas individuales; la plantación se realizó introduciendo en la gravilla aproximadamente un tercio de la longitud total del cladodio desde su base. Por restricciones de espacio debidas a las instalaciones permanentes dentro del invernadero y a la forma y tamaño de los bancales, las caras de los cladodios quedaron orientadas aproximadamente norte-sur. La densidad de plantación fue de 16.7 plantas m^{-2} , con 20 cm de distancia entre hileras y 30 cm entre plantas.

Evaluaciones

Se evaluaron brotes vegetativos de cuatro estadios de crecimiento; de manera general, los dos más pequeños como nopalito y los dos restantes como forraje. Los EC se determinaron proporcionalmente al tamaño del cladodio maduro de cada especie (Cuadro 6). Se eligió el EC2 como estadio mayor para nopalito debido a que a partir de éste, suceden la pérdida de las hojas, la turgencia, el brillo y cambios en el color, etc. Sin embargo, cabe aclarar que también los EC3 de *N. cochenillifera*, *O. undulata* x *O. tomentosa* y *O. ficus-indica* se comercializan como “nopalito picado”, con lo que los atributos de calidad señalados son poco apreciables. Como forraje generalmente se emplean cladodios más desarrollados (EC3, EC4 ó mayores).

Se cosecharon los brotes vegetativos emitidos por el cladodio plantado o planta madre; es decir, se cosechó sobre el primer nivel. La cosecha se realizó de una manera continua en el tiempo. En cada sesión, sólo se cosecharon los brotes cuya longitud estuviera dentro de la amplitud de tamaño determinado, según el tratamiento (Cuadro 6). Así, para cada cladodio madre (unidad experimental), se registró cada cosecha, el intervalo de tiempo entre cosechas (periodos parciales) y la producción acumulada. La productividad de cada tratamiento se determinó dividiendo la producción total de cada unidad experimental entre el número de días transcurridos desde que inició la brotación hasta la última cosecha. La productividad se expresó como kg de materia seca (MS) $ha^{-1} día^{-1}$. De los brotes cosechados se obtuvieron muestras para determinar el porcentaje de humedad (o de MS). Los nopalitos se fraccionaron

para disminuir el tiempo de deshidratación. Las muestras se deshidrataron a 55°C en un horno de aire forzado Marca Felisa, hasta peso constante (Anónimo, 1990b).

Cuadro 6. Amplitudes de tamaño (cm) de los cuatro estadios de crecimiento de cladodios de *Opuntia* y *Nopalea*, producidos en hidroponía.

Estadio de crecimiento	Especie			
	<i>N. cochenillifera</i> (Tamazunchale)	<i>O. robusta</i> ssp. <i>larreyi</i> (Tapón pelón)	<i>O. undulata</i> x <i>O. tomentosa</i> (Valtierrilla)	<i>O. ficus-indica</i> (Tlaconopal)
EC1	5 – 7	7 – 10	8 – 11	8 – 11
EC2	10 – 13	15 – 18	16 – 19	17 - 20
EC3	16 – 19	23 – 26	24 - 27	26 - 29
EC4	> 23	> 31	> 33	> 40

La asociación probable de la productividad con la temperatura dentro del invernadero se exploró a través del análisis de correlación para los periodos parciales. La temperatura dentro del invernadero se registró con un higrotermógrafo marca Weathertronics modelo 5020-01. Para cada periodo parcial de cosecha, se obtuvo un promedio de las temperaturas máxima, mínima y media. Sólo se utilizó la productividad correspondiente a los EC1, debido a su menor duración, pues con periodos pequeños de producción el efecto de la temperatura esta más libre de confusión.

Diseño experimental y análisis estadístico

Para evaluar la productividad, se empleó un diseño experimental de bloques completos al azar, con un arreglo factorial de tratamientos (16), con cuatro repeticiones. Los factores (y niveles) fueron: especies de nopal (cuatro) y estadios de crecimiento (cuatro) (Cuadro 6). Así, se analizó la productividad de 64 unidades experimentales (cladodios madre). Se utilizó el

procedimiento GLM y la prueba de comparación de medias LSMEANS del programa SAS (Anónimo, 1990a). El modelo estadístico empleado fue:

$$Y_{ijk} = \mu + \rho_i + \alpha_j + \gamma_k + (\alpha\gamma)_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} , es el valor observado de la característica en estudio

γ_k , es el efecto del factor b al k -ésimo nivel

μ , es la media de los tratamientos

$(\alpha\gamma)_{jk}$, es la interacción de los factores a y b

ρ_i , es efecto del bloque al i -ésimo nivel

ε_{ij} , es el error aleatorio

α_j , es el efecto del factor a al j -ésimo nivel

Los análisis de correlación se realizaron mediante el procedimiento CORR del programa SAS (Anónimo, 1990a).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La productividad media general de los nopales estudiados (*Opuntia* y *Nopalea*) fue 48.4 ± 33.14 kg de MS ha⁻¹ día⁻¹, con valores máximos y mínimos de 161.4 y 7.8 kg de MS ha⁻¹ día⁻¹. La productividad varió ampliamente en función de los tratamientos planteados, principalmente debido al factor estadio de crecimiento. Lo anterior se confirma con los resultados del análisis de varianza, que mostraron significación estadística ($p < 0.001$) para los factores estadio de crecimiento, especie y su interacción.

Efecto del estadio de crecimiento

La productividad aumentó ($p < 0.001$) directamente con el estadio de crecimiento (Figura 11). Lo anterior debido a que el área fotosintética y por lo tanto la asimilación, también se incrementan con el crecimiento. De hecho, la producción de biomasa se incrementa

a una tasa mayor que el área fotosintética, lo que genera una relación curvilínea ($r^2=0.99$) entre estas variables (García de Cortázar y Nobel, 1992). Así, la cosecha de cladodios pequeños limitó la asimilación y con ello, la productividad.

Para nopalito tierno (EC1), la productividad fue menor que para nopalito del EC2 (Figura 11). El nopalito más pequeño se considera como un producto de excelente calidad (Flores y Olvera, 1994), lo cual se confirma por algunas de sus características químicas (Rodríguez-Félix y Cantwell, 1988) y físicas (Cantwell, 1992). Es probable que lo anterior influya en la preferencia por los nopalitos tiernos (EC1), lo que se refleja en su precio que puede ser mayor (de 50 a 100 %) que el de los nopalitos de los EC2 y EC3. Considerando lo anterior, es posible que el mayor precio del nopalito de los EC1 compense su menor productividad.

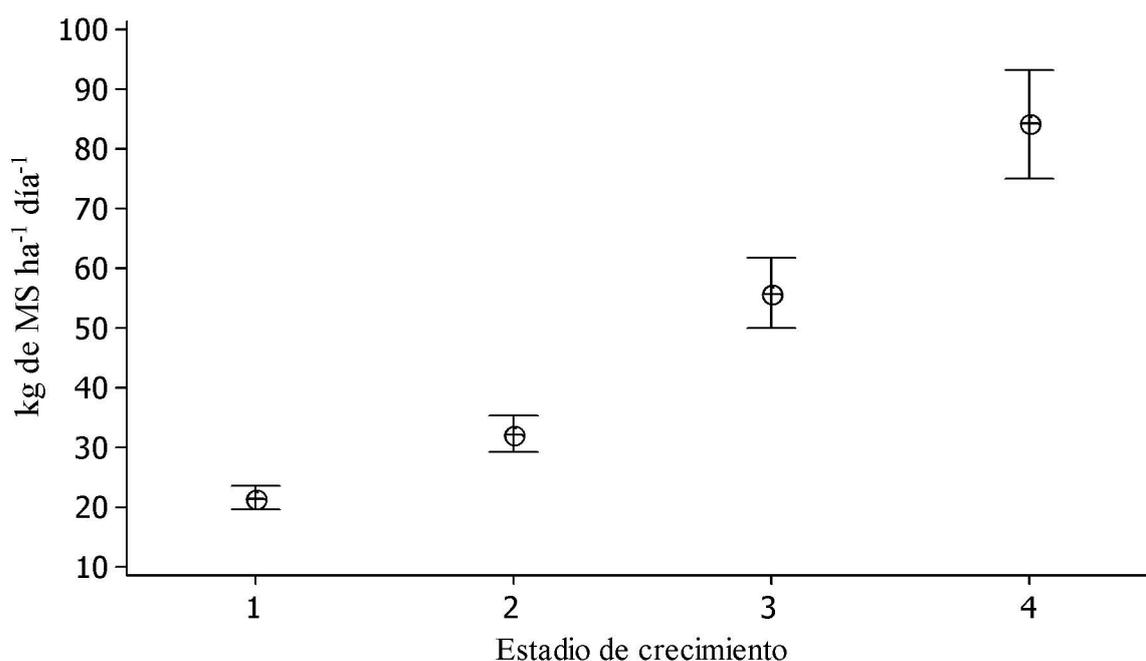


Figura 11. Efecto del estadio de crecimiento a la cosecha en la productividad del nopal en hidroponía. Las barras indican el error estándar.

La productividad de los nopales en el EC4 fue mayor ($p<0.001$) que en el EC3 (Figura 11). Sin embargo, el aumento de la productividad debido al desarrollo también se caracteriza por la disminución de la calidad nutrimental (Collins y Fritz, 2003). En los nopales

desarrollados en suelo, la proteína cruda (PC) presente en la materia seca disminuye con el crecimiento (Gregory y Felker, 1992). De manera similar, en nopal producido en hidroponía la PC disminuyó significativamente de los EC2 a los EC3 (21.7 y 17.9 %, respectivamente), pero fue estadísticamente similar entre los EC3 y los EC4 (16.9 %); el contenido de FDN fue estadísticamente similar en cladodios de los EC2 y EC3, pero se incrementó significativamente de los EC3 a los EC4 (Ramírez-Tobías *et al.*, en preparación). Con base en lo anterior, la cantidad absoluta de proteína cosechada para los EC2, EC3 y EC4 sería 6.9, 9.9 y 14.2 kg de PC ha⁻¹ día⁻¹, respectivamente. Así, la utilización de cladodios de los EC2 como forraje implicaría una disminución importante en biomasa y nutrientes; y la elevada cantidad de FDN en los EC4 influiría negativamente en la digestibilidad (Duque, 2003). Por lo anterior es posible sugerir que en general, el EC3 es el estadio óptimo para el mejor aprovechamiento del nopal hidropónico como forraje; aunque de manera específica, dicho EC puede variar debido probablemente a las proporciones desiguales de FDN y FDA presentes entre *O. robusta* spp. *larreyi*, *O. undulata* x *O. tomentosa*, *O. ficus-indica* y *N. cochenillifera* producidos en hidroponía (Ramírez-Tobías *et al.*, en preparación). Además, para confirmar lo anterior es recomendable la realización de ensayos de digestibilidad del nopal producido en hidroponía.

Efecto de la especie

Las especies más productivas fueron *O. undulata* x *O. tomentosa* y *O. robusta* ssp. *larreyi*, ambas con valores estadísticamente iguales, pero mayores ($p < 0.001$) que *O. ficus-indica*. *N. cochenillifera* presentó la menor ($p < 0.001$) productividad (Figura 12). La diferencia en la productividad de *N. cochenillifera* con respecto a las tres especies de *Opuntia*, probablemente se explique por su menor área fotosintética, derivada de su menor tamaño. Lo anterior se debe a que la absorción de CO₂ depende del área expuesta al intercambio gaseoso y al flujo de fotones fotosintéticos (Nobel, 1998). Además, su menor tamaño pudo limitar la disponibilidad de las reservas metabólicas necesarias para la fotosíntesis.

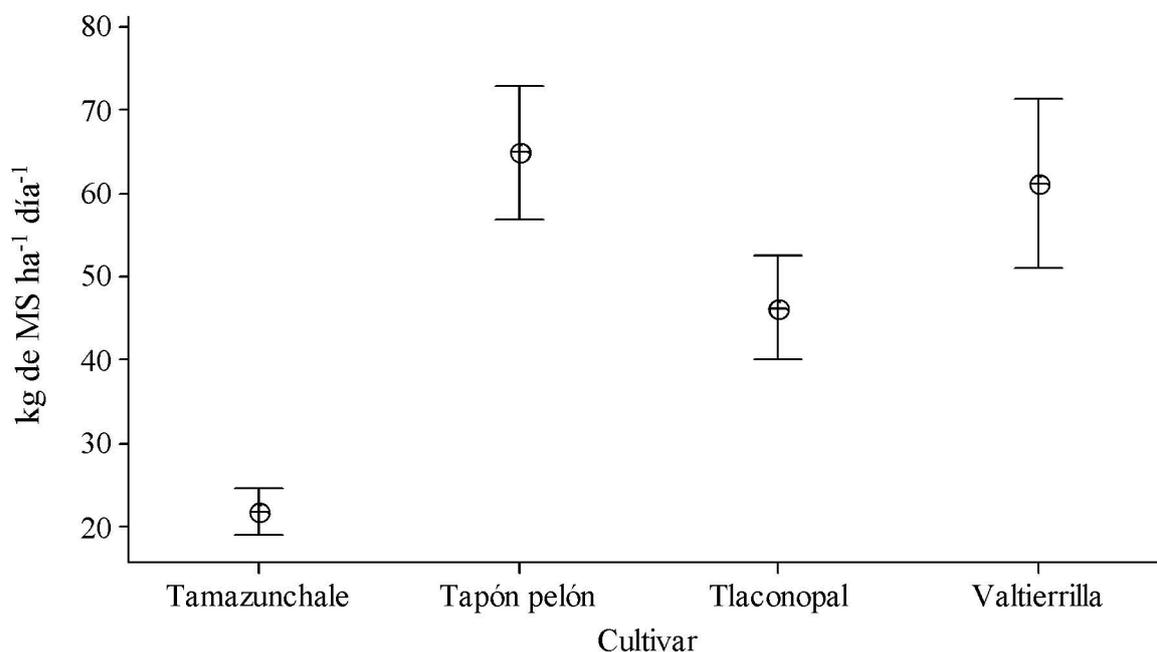


Figura 12. Efecto del genotipo en la productividad del nopal en hidroponía. (Tamazunchale, *N. cochenillifera*; Tapón pelón, *O. robusta* ssp. *larreyi*; Tlaconopal, *O. ficus-indica* y Valtierrilla, *O. undulata* x *O. tomentosa*). Las barras indican el error estándar.

Calderón (1995) también encontró diferencias en producción debidas al genotipo, las cuales se asociaron a su distinta velocidad de crecimiento. El crecimiento y consecuentemente la productividad de las plantas están regulados principalmente por las condiciones ambientales, el genotipo, la disponibilidad de agua y nutrimentos (Nobel, 1988; Gárate y Bonilla, 2000), de lo cual en ambos casos sólo los genotipos fueron diferentes. La absorción neta de CO₂ es un factor específico relacionado directamente con el crecimiento y la productividad, y existen diferencias en la absorción de CO₂ entre especies, como lo señalaron Nobel y Hartsock (1981) para tres especies de *Agave*; tales diferencias se mantuvieron a pesar de la aclimatación y se asociaron con las condiciones térmicas de las regiones de procedencia. De manera similar, en esta investigación el principal factor ambiental que presentó variaciones importantes durante el periodo experimental fue la temperatura, y al parecer, cada especie tendió a presentar distinta reacción a esas variaciones en la temperatura. Así, la mayor

productividad de *O. undulata* x *O. tomentosa* y *O. robusta* ssp. *larreyi* puede deberse a su mayor tolerancia a las fuertes oscilaciones térmicas, diarias y estacionales, registradas en el invernadero.

Odum (1972) señala el empleo de los prefijos “euri” (amplio) y “esteno” (estrecho) para designar la amplitud relativa de tolerancia a un factor ambiental. Así, con base en los datos climatológicos de la región de procedencia (García, 1988), es posible suponer a *O. robusta* ssp. *larreyi* y *O. undulata* x *O. tomentosa* como especies euritéricas; además, que la amplitud de tolerancia de la primera tendrá una moda en temperaturas más bajas, que la segunda. *O. ficus-indica* y *N. cochenillifera* parecen tolerar amplitudes de temperatura estrechas, por lo que comparativamente se pueden clasificar como estenotéricas, pero con tendencias microtérmicas y macrotéricas, respectivamente. A pesar de que el experimento se realizó en invernadero, durante el periodo de evaluación los promedios de temperaturas medias, de máximas y de mínimas fueron 23.5, 35.6 y 11.3 °C, respectivamente, y ocurrieron temperaturas mínimas absolutas de 1 °C. Bajo estas condiciones las especies euritéricas presentaron la mayor productividad; y es probable que los extremos de temperaturas registradas durante el experimento inhibieran de manera diferencial el crecimiento de las especies estenotéricas, lo cual provocó que sus productividades fueran bajas.

Efecto de la interacción especie*estadio de crecimiento

La productividad de las cuatro especies fue desigual para cada EC a la cosecha, pero en general se incrementó con el crecimiento (Figura 13). Para nopalito tierno (EC1), sólo se encontraron diferencias estadísticas ($p < 0.05$) entre *O. robusta* ssp. *larreyi* y *N. cochenillifera*, ya que su productividad fue la máxima y mínima, respectivamente. Sin embargo, en el EC2 *O. robusta* ssp. *larreyi*, *O. undulata* x *O. tomentosa* y *O. ficus-indica* formaron un grupo de mayor ($p < 0.05$) productividad que la de *N. cochenillifera*. El incremento en la productividad de las especies de *Opuntia* fue significativo de un estadio de crecimiento a otro. Por el contrario, la productividad de *N. cochenillifera* sólo se incrementó significativamente de los EC1 y EC2 al EC4, es decir, entre estadios de crecimiento extremos. Así, la productividad de *N. cochenillifera* en los EC2, EC3 y EC4 fue estadísticamente menor que la del resto de las

especies. *O. robusta* ssp. *larreyi* y *O. undulata* x *O. tomentosa* presentaron la mayor ($p < 0.05$) productividad para forraje. En el EC3, *O. robusta* ssp. *larreyi* presentó la productividad más alta, diferente ($p < 0.01$) que *O. ficus-indica*, pero igual que *O. undulata* x *O. tomentosa*. En el EC4, la productividad de *O. undulata* x *O. tomentosa* fue superior estadísticamente a la del resto de las especies (Figura 13).

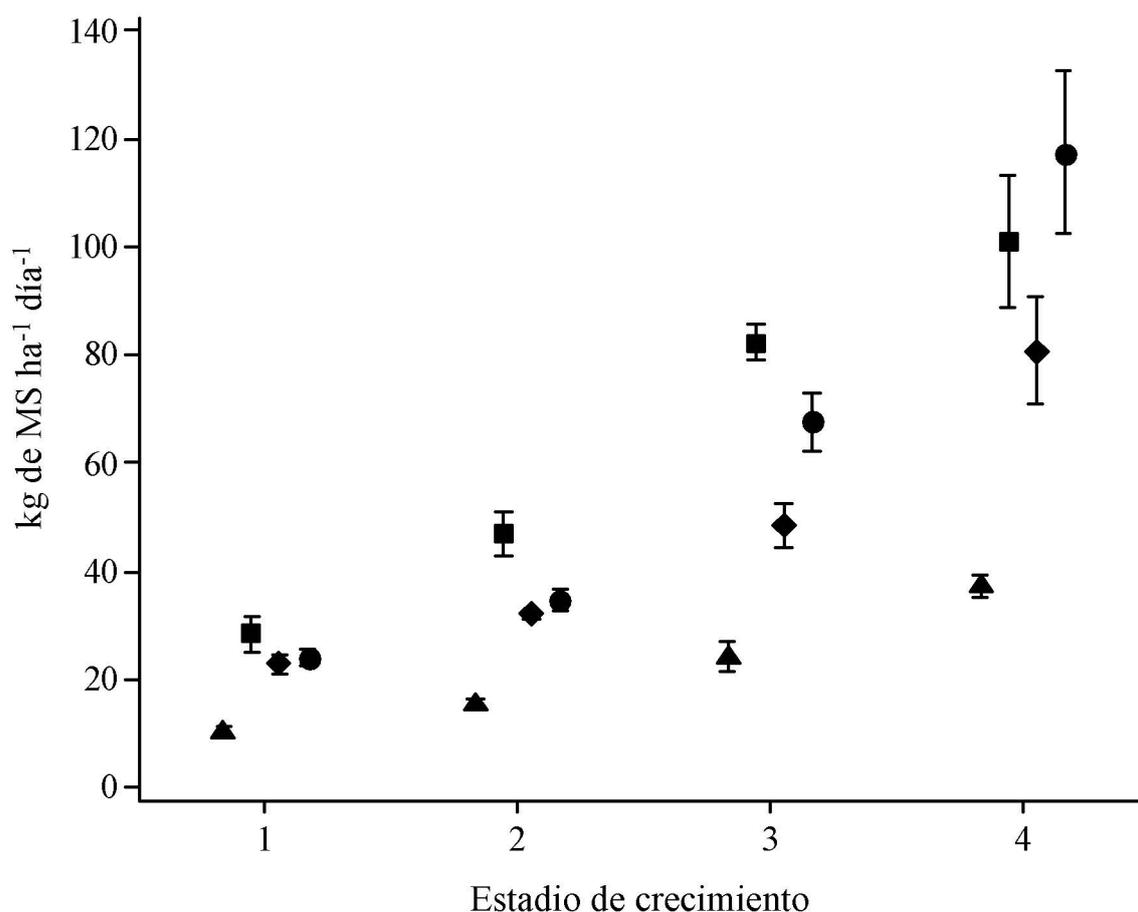


Figura 13. Efecto del desarrollo a la cosecha en la productividad de nopales en hidroponía. (▲ *N. cochenillifera*, ◆ *O. ficus-indica*, ■ *O. robusta* ssp. *larreyi* y ● *O. undulata* x *O. tomentosa*). Las barras indican el error estándar.

Los resultados de esta investigación confirman que la productividad del *Opuntia* es muy superior en hidroponía que en sistemas de producción en suelo. La producción anual de nopalito declarada para algunos lugares de México en plantas que crecen en suelo, con

densidades promedio de 27,000 plantas ha^{-1} (sistema tradicional en hileras) y de 120,000 a 150,000 plantas ha^{-1} (sistema intensivo en camas) es de 40 a 90 t de materia fresca (MF) ha^{-1} (Flores y Olvera, 1994) y de 112 t de MF ha^{-1} (Blanco-Macías *et al.*, 2004), respectivamente. Mientras que en hidroponía, *O. ficus-indica* la variante de *Opuntia* que en este experimento fue menos productiva, generó 22.9, 32.1 y 48.5 t de MS $\text{ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ en los EC1, EC2 y EC3, respectivamente. Lo anterior corresponde aproximadamente a 141.6, 264.5 y 470.3 t de nopalito (MF) $\text{ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, respectivamente. En relación con la producción de cladodios para forraje, Gonzaga y Cordeiro (2005) señalan productividades de *Opuntia* de 10 t de MS $\text{ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. En la presente investigación, la productividad media de las tres especies de *Opuntia* en el EC4 fue 99.8 kg de MS $\text{ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$, aproximadamente 36.5 t de MS $\text{ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. En el noreste semiárido de Brasil *N. cochenillifera* produce hasta 8.6 t de MS $\text{ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ sin diferencias estadísticas con algunas variantes altamente productivas de *O. ficus-indica* (Gonzaga y Cordeiro, 2005). En esta investigación, para el EC4 de *N. cochenillifera* se registraron 37.3 t de MS $\text{ha}^{-1} \text{ día}^{-1}$ equivalentes a 13.6 t de MS $\text{ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Los datos de temperatura señalados por Cordeiro *et al.* (1994) para algunas regiones donde se cultiva *Opuntia* y *Nopalea* en Brasil, presentan cierta similitud con los de las regiones de procedencia de *N. cochenillifera* en México (García, 1988), lo cual explicaría la productividad elevada de *N. cochenillifera* en Brasil. Así, a pesar de que la productividad vegetal se incrementa bajo condiciones óptimas (Nobel, 1998), las cuales parcialmente aporta la hidroponía (Sánchez y Escalante, 1983; Mondragón *et al.*, 2001); la productividad de *N. cochenillifera* en hidroponía sólo es ligeramente mayor que la registrada bajo cultivo en suelo en Brasil. De manera que es posible que las condiciones climáticas limiten a esta especie en mayor proporción que la disponibilidad de agua y nutrimentos.

Las diferencias en productividad de los sistemas de producción de nopal en suelo y en hidroponía se deben en gran parte a que con la hidroponía se consigue un balance casi ideal de aire, agua y nutrimentos; además, se pueden controlar otros factores, como el drenaje y el pH (Sánchez y Escalante, 1983). Gárate y Bonilla (2000) mencionan que el aumento de cualquiera de los factores de crecimiento como luz, agua, CO_2 y nutrimentos, propicia un incremento de la producción vegetal. Además, Nobel (1998) señala que la máxima productividad de algunas plantas MAC como *O. ficus-indica*, sucede cuando variables ambientales como la disponibilidad de agua, la temperatura y el flujo de fotones fotosintéticos presentan valores

óptimos para la absorción neta de CO₂. Por otro lado, una mayor disponibilidad de nutrientes propicia mayor absorción de los mismos y consecuentemente mayor producción de biomasa (Calderón, 1995; Nobel *et al.*, 1987). Así, la productividad de algunas especies MAC, como el nopal puede ser extremadamente alta cuando se le proporcionan algunas condiciones óptimas (Nobel, 1998), como sucede en la hidroponía (Mondragón *et al.*, 2001).

La mayor productividad se registró con *O. robusta* ssp. *larreyi* y *O. undulata* x *O. tomentosa* en los EC4, con valores de 101 y 117.6 kg de MS ha⁻¹ día⁻¹, equivalentes a 36.0 y 41.9 t de MS ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente. La productividad de *O. ficus-indica* en condiciones cercanas a las ideales fue de 47 t de MS ha⁻¹ año⁻¹ (Nobel *et al.*, 1992); esto se logró con la aplicación diaria de una solución nutritiva, relación de temperatura diurna/nocturna de 24/11 °C y un índice (adimensional) de área de tallo entre 4 y 6, con cladodios cuyas caras estuvieron orientadas este-oeste. En la presente investigación, la disponibilidad de agua y nutrientes no constituyeron un factor limitativo (Calderón, 1995; Olmos *et al.*, 1999). Durante el periodo de estudio las temperaturas medias diarias de máximas/mínimas fueron 34.5/10 °C, el índice de área de tallo probablemente presentó valores cercanos a dos y las caras de los cladodios estuvieron orientadas norte-sur. Así, es probable que los factores que limitaron la productividad fueran las fuertes fluctuaciones diarias de temperatura, el flujo de fotones fotosintéticos que fue bajo debido al índice de área de tallo y a la presencia de la malla sombra en el techo del invernadero, y la orientación de los cladodios (Becerra *et al.*, 1976).

Frecuencia de cosecha

En general, el intervalo de tiempo entre cosechas aumenta directamente con el crecimiento, mientras que el número de cosechas totales disminuye. Así, la frecuencia de cosechas disminuye con el crecimiento. Los nopalitos (EC1 y EC2) requirieron en promedio un intervalo de tiempo similar para presentar el tamaño adecuado (Cuadro 7); excepto para *O. undulata* x *O. tomentosa* en el EC1 y *O. ficus-indica* en el EC2, cuya frecuencia de cosecha fue ligeramente mayor y menor, respectivamente. Por otro lado, en los EC3 y EC4, los intervalos entre cosechas se incrementaron en mayor proporción para *O. ficus-indica*, probablemente por su menor productividad (Cuadro 7). El criterio en el que se basan los

cultivadores y recolectores del nopal para realizar la cosecha de los brotes vegetativos, ya sea para aprovecharlos como nopalito o como forraje, es el tamaño del cladodio o estadio de crecimiento. Lo anterior requiere que las actividades de cosecha tengan una determinada frecuencia para una mayor aproximación a la calidad deseada; lo que es importante desde la perspectiva de la planeación de actividades en los sistemas de producción. Así, lo deseable sería una frecuencia baja de cosecha y una producción alta por cada una de ellas, es decir una eficiencia alta en la cosecha. En esta investigación *O. robusta* ssp. *larreyi* y *O. undulata* x *O. tomentosa* presentaron la mayor productividad. Sin embargo, los intervalos a la cosecha fueron diferentes sobre todo en los EC3 y EC4. De acuerdo con lo anterior, es posible sugerir que la eficiencia en la cosecha de *O. robusta* ssp. *larreyi* fue mayor que la de *O. undulata* x *O. tomentosa*, al requerir ésta última, un mayor número de cortes para presentar su elevada productividad.

Cuadro 7. Frecuencia (intervalo medio y número de cosechas) de cosecha según el estadio de crecimiento (EC) al corte, durante el periodo experimental (10 de enero-2 de diciembre de 2005).

Especie	EC1		EC2		EC3		EC4	
	IMC	NC	IMC	NC	IMC	NC	IMC	NC
<i>N. cochenillifera</i>	10	32	12	27	16	17	20	14
<i>O. ficus-indica</i>	11	25	15	16	19	14	31	7
<i>O. robusta</i> ssp. <i>larreyi</i>	10	26	12	21	19	12	22	9
<i>O. undulata</i> x <i>O. tomentosa</i>	8	36	12	24	14	19	20	14

IMC, intervalo medio entre cosechas (días); NC, media del número total de cosechas realizadas (n=4)

Efecto de la temperatura

Sólo se encontraron correlaciones positivas y significativas entre las temperaturas medias de máximas y la productividad de los EC1 de *O. robusta* ssp. *larreyi* y *O. undulata* x *O. tomentosa*; y negativa y significativa entre las medias de temperaturas mínimas y la

productividad de *O. robusta* ssp. *larreyi* (Cuadro 8). Las productividades de *N. cochenillifera* y *O. ficus-indica* carecieron de asociación probable con la temperatura.

La reacción favorable de *O. robusta* ssp. *larreyi* y de *O. undulata* x *O. tomentosa* a las altas temperaturas se debe considerar en el contexto de las fuertes oscilaciones térmicas diarias, esto es de temperaturas medias de mínimas relativamente bajas. Downton *et al.* (1984) sugieren que las especies que durante su desarrollo han tolerado mayor amplitud de condiciones, se aclimatan mejor a condiciones extremas. Así, los valores óptimos de actividad fisiológica en los individuos aclimatados cambian en relación con las condiciones del ambiente, como la temperatura (Seemann *et al.*, 1984), mientras que los de las especies no aclimatables cambian poco (Downton *et al.*, 1984), lo que puede explicar la carencia de asociación de la productividad de *O. ficus-indica* y *N. cochenillifera* con la temperatura. La correlación negativa y significativa entre la productividad de *O. robusta* ssp. *larreyi* y las temperaturas medias de mínimas es destacable, pues es bien conocido en esta región que el nopal Tapón silvestre (*O. robusta* ssp. *robusta*) es el primero en brotar al aproximarse la primavera, cuando comienzan a presentarse temperaturas relativamente altas durante el día junto con temperaturas nocturnas bajas (J.R. Aguirre R., 2006. Com. pers.).

Cuadro 8. Correlación entre la productividad de *Opuntia* spp. y *Nopalea* sp. y los promedios de temperaturas mínimas, máximas y medias, de los periodos parciales.

Variables	Coefficiente de correlación	Significación estadística	gl
<i>N. cochenillifera</i> - media de mínimas	-0.0739	NS	53
<i>N. cochenillifera</i> - media de máximas	-0.0988	NS	53
<i>N. cochenillifera</i> - media de promedios	-0.1179	NS	53
<i>O. robusta</i> ssp. <i>larreyi</i> - media de mínimas	-0.4622	***	45
<i>O. robusta</i> ssp. <i>larreyi</i> - media de máximas	0.5307	***	46
<i>O. robusta</i> ssp. <i>larreyi</i> - media de promedios	0.1299	NS	47
<i>O. ficus-indica</i> - media de mínimas	0.0365	NS	32
<i>O. ficus-indica</i> - media de máximas	0.2281	NS	32
<i>O. ficus-indica</i> - media de promedios	0.1810	NS	32
<i>O. undulata</i> x <i>O. tomentosa</i> - media de mínimas	0.0943	NS	56
<i>O. undulata</i> x <i>O. tomentosa</i> - media de máximas	0.3253	*	57
<i>O. undulata</i> x <i>O. tomentosa</i> - media de promedios	0.2545	NS	56

*: $p < 0.05$; ***: < 0.001 y NS: $p > 0.05$

Con base en los datos de García (1988), el límite térmico inferior de la amplitud de tolerancia térmica de *N. cochenillifera* es mayor (temperatura media del mes más frío mayor que 18 °C) que los límites térmicos inferiores de *O. robusta* ssp. *larreyi* y *O. ficus-indica* (de -3 a 18 °C de temperatura media del mes más frío) y de *O. undulata* x *O. tomentosa* (temperatura media en el mes más frío menor que 18 °C). Por otro lado, *O. ficus-indica* presenta un límite térmico superior más bajo que las otras especies (temperatura media del mes más caliente menor que 22 °C). Así, es probable que las bajas temperaturas nocturnas y las altas temperaturas diurnas inhibieran el crecimiento de *N. cochenillifera* y de *O. ficus-indica* a pesar de las temperaturas (diurnas y nocturnas, respectivamente) más favorables y sin relación consistente con las variables térmicas evaluadas. Por lo anterior, es recomendable realizar tal evaluación considerando una variable más sensible a los cambios diarios y estacionales de temperatura.

CONCLUSIONES

En las condiciones de este experimento, la reacción general de *Opuntia* al sistema hidropónico fue mejor que la de *Nopalea*.

La productividad del nopal se incrementa conforme se cosechan cladodios de mayor tamaño.

Como nopalito tierno (EC1), *O. robusta* ssp. *larreyi* y *O. undulata* x *O. tomentosa* fueron las especies más productivas; como nopalito maduro (EC2) la productividad de las tres especies de *Opuntia* fue similar, pero mayor que la de *N. cochenillifera*.

Como forraje, las especies de *Opuntia* más productivas fueron *O. robusta* ssp. *larreyi* y *O. undulata* x *O. tomentosa*.

Como nopalito o como forraje, *N. cochenillifera* fue el nopal menos productivo; es probable que esto sea una diferencia de género.

La productividad de *O. undulata* x *O. tomentosa* y de *O. robusta* ssp. *larreyi* se correlacionó positiva y significativamente con la media de temperaturas máximas. Además, *O. robusta* ssp. *larreyi* se correlacionó negativa y significativamente con la media de temperaturas mínimas.

Las productividades de *O. ficus-indica* y *N. cochenillifera* carecieron de relación probable con la temperatura.

O. undulata x *O. tomentosa* requirió la mayor frecuencia de cosecha, *O. ficus-indica*, la menor.

La productividad de *Opuntia* en hidroponía podría ser hasta cinco veces mayor que la productividad registrada para nopal desarrollado en suelo a la intemperie.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo financiero otorgado inicialmente por el Fondo de Apoyo a la Investigación de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí mediante el convenio CO4-FAI-04-37.37; y posteriormente por la Comisión Nacional de las Zonas Áridas y la Fundación Produce San Luis Potosí, A.C. Se agradece al grupo de productores “Luchadores de San José de la Peña” su apoyo y la disponibilidad de su infraestructura. El primer autor agradece al CONACYT la beca Núm. 181453 otorgada para realizar sus estudios de maestría.

LITERATURA CITADA

- Anaya P., M.A. 2001. History of the use of *Opuntia* as forage in México. In: C. Mondragón-Jacobo; S. Pérez-González (Eds.). Cactus (*Opuntia* spp.) as forage. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. pp. 3-12.
- Anónimo. 1970. Carta de climas San Luis Potosí. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. México, D.F. México.
- Anónimo. 1976. Carta topográfica, Villa de Guadalupe (F-14-A34), escala 1:50 000. Comisión de Estudios del Territorio Nacional. México, D.F. México.
- Anónimo. 1990a. User's Guide: Statistics. SAS Inst. Inc. Cary, North Caroline. USA. 1028 p.
- Anónimo. 1990b. Official Methods of Analysis. 15th ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington, D.C. USA. 1298 p.
- Anónimo. 1992. Atlas Nacional de México; Carta IV 4.5, Temperaturas extremas. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. México.
- Arruda, G.P.; G.P. Arruda F.; J.F. Warumby. 1999. Introducción y utilización de las cactáceas *Nopalea cochenillifera* (L.) y *Opuntia ficus-indica* en el Brasil. En: J.R. Aguirre R.; J.A. Reyes A. (Eds.). Memoria del VIII Congreso Nacional y VI Congreso Internacional Sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, SLP. México. pp. 101-102.
- Becerra R., S.; F. Barrientos P.; D. Díaz M. 1976. Eficiencia fotosintética del nopal (*Opuntia* spp.) en relación con la orientación de sus cladodios. *Agrociencia*. 24: 67-77.
- Blanco-Macías, F. R.; R.D. Valdez-Cepeda; R. Ruiz-Garduño; M. Márquez-Madrid. 2004. Producción intensiva de nopalito orgánico durante cuatro años en Zacatecas. En: C.A. Flores V. (Ed.). Memoria del X Congreso Nacional y VII Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal y del Fifth International Congress on Cactus Pear and Cochineal. Universidad Autónoma Chapingo, Food and Agriculture Organization e International Society for Horticultural Science. Chapingo, Estado de México, México. Edición en disco compacto.
- Calderón P., N. 1995. Efecto de la salinidad en la producción de materia seca y absorción nutrimental de plantas micropropagadas de nopal (*Opuntia* spp.). Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México. 96 p.

- Cantwell, M. 1992. Aspectos de calidad y manejo postcosecha de nopalitos. En: S. Salazar; D. López (Eds.). Memoria del V Congreso Nacional y III Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México. p 110.
- Collins, M.; J.O. Fritz. 2003. Forage quality. In: R.F. Barnes; C. J. Nelson; M. Collins; K. J. Moore (Eds.). Forages. 6th ed. Iowa State Press. Ames, Iowa. USA. pp. 363-390.
- Cordeiro dos S., D.; I. Farias; M.M Amâncio do N.; M. de A. Lira.; J. Nildo T. 1994. Produtividade de cultivares de palma forrageira (*Opuntia e Nopalea*). Pesquisa Agropecuária Brasileira. 29: 1947-1957.
- Cordeiro dos S., D.; M.A. Lira.; I. Farias.; F.M. Dias.; F.G. Silva. 2004. Competition of forage cactus varieties under semi-arid conditions in the northeast of Brazil. En: C.A. Flores V. (Ed.). Memoria del X Congreso Nacional y VII Congreso Internacional, sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal y del Fifth International Congress on Cactus Pear and Cochineal. Universidad Autónoma Chapingo, Food and Agriculture Organization e International Society for Horticultural Science. Chapingo, Estado de México. México. Edición en disco compacto.
- Cordeiro dos S., D.; S. Gonzaga de A. 2001. Fodder nopal use in the semi-arid northeast of Brazil. In: C. Mondragón-Jacobo; S. Pérez-González (Eds.). Cactus (*Opuntia* spp.) as forage. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. pp. 37-50.
- De Alba, J. 1971. Alimentación del ganado en América Latina. 2^a ed. La Prensa Médica Mexicana. México, D.F. México. 475 p.
- Downton, W.J.S.; J.A. Berry; J.R. Seemann. 1984. Tolerance of photosynthesis to high temperature in desert plants. Plant physiology. 74: 786-790.
- Duque B., R. 2003. Valoración nutricional del nopal forrajero para rumiantes. Tesis profesional. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, SLP. México. 24 p.
- Fischer, R.A.; N.C. Turner. 1978. Plant productivity in the arid and semiarid zones. Annual Review in Plant Physiology. 29: 277-317.
- Flores V., C.A. 2001. El uso del nopal para forraje en el mundo. En: C.A. Flores V. Memoria del curso-taller “El nopal forrajero, una alternativa alimentaria para el ganado”.

- Universidad Autónoma de Nuevo León. Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México. pp.18-39.
- Flores V., C.A.; J. Olvera M. 1994. El sistema-producto nopal verdura en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos; Universidad Autónoma Chapingo; Centro de Investigaciones Económicas, Sociales y Tecnológicas de la Agroindustria y la Agricultura Mundial. Chapingo, Estado de México. México. 150 p.
- Flores V., C.A.; J.R. Aguirre R. 1979. El nopal como forraje. Universidad Autónoma Chapingo. Estado de México. México. 80 p.
- Gallegos-Vázquez, C.; E. Olivares-Sáenz; R. Vázquez-Alvarado; F. Zavala-García. 2000. Absorción de nitrato y amonio por plantas de nopal en hidroponía. *Terra*. 18: 133-139.
- Gárate, A.; I. Bonilla. 2000. Nutrición mineral y producción vegetal. En: J. Azcón-Bieto; M. Talón (Eds.). *Fundamentos de fisiología vegetal*. Mc. Graw Hill. Madrid, España. pp. 113-130.
- García de Cortázar, V.; P.S. Nobel. 1992. Biomass and fruit production for the prickly pear cactus, *Opuntia ficus-indica*. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 117: 558-562.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 4ª ed. Editado por la autora. México, D.F. México. 218 p.
- Gonzaga de A., S.; D. Cordeiro dos S. 2005. Palma forrageira. Em: L.H. Piedade; E. Assis M. (Eds.). *Espécies vegetais exóticas com potencialidades para semi-árido brasileiro*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Brasília, D.F. Brasil. pp. 91-127.
- Gregory, R.A. y P. Felker. 1992. Crude protein and phosphorus contents of eight contrasting *Opuntia* forage clones. *Journal of Arid Environments*. 22: 323-331.
- Kanwar, J.S. 1978. Crops of the arid and semi-arid areas of India – problems and potentials. In: S. Mann H. (Ed.). *Arid zone Research and Development*. International Symposium on Arid Zone Research Institute. Scientific Publishers. Jodhpur, India. pp. 199-204.
- López-Ramos, E. 1993. *Geología general y de México*. 7ª ed. Trillas. México, D.F. México. 288 p.
- Mondragón J., C.; S de J. Méndez G.; G. Olmos O. 2001. Cultivation of *Opuntia* for fodder production: from re-vegetation to hydroponics. In: C. Mondragón-Jacobo; S. Pérez-

- González (Eds.). Cactus (*Opuntia* spp.) as forage. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. pp. 107-122.
- Nobel, P.S. 1988. Environmental biology of agaves and cacti. Cambridge University Press. New York, N.Y. USA. 270 p.
- Nobel, P.S. 1998. Los incomparables agaves y cactus. Trillas. México, D.F. México. 211 p.
- Nobel, P.S.; C.E. Russell; P. Felker; J. Galo M.; E. Acuña. 1987. Nutrient relations and productivity of prickly pear cacti. *Agronomy Journal*. 79: 550-555.
- Nobel, P.S.; E. García-Moya; E. Quero. 1992. High annual productivity of certain agaves and cacti under cultivation. *Plant, Cell and Environment*. 15: 329-335.
- Nobel, P.S.; T.L. Hartsock. 1981. Shifts in the optimal temperature for nocturnal CO₂ uptake caused by changes in growth temperature for cacti and agaves. *Physiologia plantarum*. 53: 523-527
- Odum, E. P. 1972. Ecología. 3ª ed. Interamericana. México, D.F. México. 639 p.
- Olmos O., G.; S. de J. Méndez G.; J. Martínez H. 1999. Evaluación de 29 cultivares de nopal para producción de forraje en hidroponía. En: J.R. Aguirre R. y J.A. Reyes A. (Eds.). Memoria del VIII Congreso Nacional y VI Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, SLP. México. pp. 105-106.
- Ramírez-Tobías, H.M.; J.A. Reyes-Agüero; J.R. Aguirre-Rivera; J.M. Pinos-Rodríguez. (En preparación). Características nutrimentales de cladodios de *Opuntia* spp. y *Nopalea* sp. producidos en hidroponía.
- Rodríguez-Félix, A.; M. Cantwell. 1988. Developmental changes in composition and quality of prickly pear cactus cladodes (nopalitos). *Plant Foods for Human Nutrition*. 38: 83-93.
- Sáenz, C.; E. Sepúlveda; B. Matsuhira. 2004. *Opuntia* spp. mucilage's: a functional component with industrial perspectives. *Journal of Arid Environments*. 57: 275-290.
- Sánchez del C., F.; E.R. Escalante R. 1983. Hidroponía. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México. 194 p.
- Sánchez V., G. 1995. Estimación del área fotosintética caulinar de *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dick. En: E. Pimienta B.; C. Neri L.; A. Muñoz U.; F.M. Huerta M. (Comp.). Memoria del VI Congreso Nacional y IV Congreso Internacional sobre Conocimiento

- y Aprovechamiento del Nopal. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco. México. pp. 103-106.
- Seemann, J.R.; J.A. Berry; W.J.S. Downton. 1984. Photosynthetic response and adaptation to high temperature in desert plants. A comparison of gas exchange and fluorescence methods for studies of thermal tolerance. *Plant physiology*. 75: 364-368.
- White, G.F. 1961. Science and the future of arid lands. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. Paris, France. 95 p.

Discusión general

Los resultados encontrados en el presente estudio confirman lo señalado por algunos autores (Sánchez y Escalante, 1983; Nobel, 1998; Mondragón-Jacobo *et al.*, 2001), respecto a la reacción favorable de algunas plantas, como el nopal, a las condiciones proporcionadas a través del cultivo hidropónico. Así, con la hidroponía, la producción de nopalito y forraje de *Opuntia* podría ser hasta cinco veces mayor con respecto a los sistemas de producción en suelo. Por otro lado, la calidad nutrimental también mejoró ampliamente; por ejemplo, el contenido medio de proteína cruda (PC) registrado para los EC3 y EC4 fue 17.3 %, valor similar al que presenta la materia seca de la alfalfa verde (de Alba, 1971). La mayor productividad del nopal en hidroponía puede deberse al aceleramiento de los procesos biológicos en reacción con la elevada disponibilidad de agua y nutrientes, principalmente (Sánchez y Escalante, 1983; Nobel, 1987), que propiciaron una tasa de crecimiento alta (Calderón, 1995). Con respecto a la calidad del nopal como forraje, la información disponible permite reconocer la tendencia del incremento de algunos atributos como la proteína cruda (PC) en relación con los nutrientes disponibles, principalmente el nitrógeno (Nobel, 1983; Calderón, 1995).

La homogeneidad del sistema de producción empleado permitió confirmar con menor duda, lo señalado por diversos autores (Gregory y Felker, 1992; Flores *et al.*, 1995; Pinos-Rodríguez *et al.*, 2003) sobre el efecto de la especie y el estadio de desarrollo en algunos atributos de la calidad nutrimental del nopal. Al respecto, el factor estadio de crecimiento resultó significativo con respecto al porcentaje de materia seca (MS), proteína cruda (PC) fibra insoluble en detergente neutro (FDN), fibra insoluble en detergente ácido (FDA) y cenizas, mientras que el factor especie sólo fue significativo para los contenidos de MS, FDN y FDA. Lo anterior coincide con lo señalado por Collins y Fritz (2003), quienes indican que de todos los factores que afectan la calidad forrajera de las plantas, el estadio de desarrollo suele ser el más importante. La disminución de la calidad nutrimental de los forrajes se debe en gran parte a la acumulación de lignina en las paredes celulares (de Alba, 1971; Revilla y Zarra, 2000; Collins y Fritz, 2003), a la translocación del nitrógeno hacia los tejidos más jóvenes con mayor actividad fotosintética (Thomas y Stoddart, 1980; Quesada y Valpuesta, 2000) y a la acumulación de minerales, principalmente Ca (Nobel, 1983), del cual una amplia proporción

se presenta como cristales de oxalato de calcio, una forma química no disponible para el aprovechamiento por animales y humanos (Mcconn y Nakata, 2004). Lo anterior propicia la disminución de la digestibilidad en relación con la edad (Collins y Fritz, 2003), y de una manera más específica, con el estadio de crecimiento. Así, es probable que a pesar de la mayor biomasa producida con el EC4, su digestibilidad sea baja y quizá resulte más adecuado aprovechar para forraje los cladodios del EC3; sin embargo, es necesario realizar pruebas de digestibilidad para confirmar lo anterior. Por otro lado, las diferencias estadísticas encontradas en los contenidos de MS, FDN y FDA entre especies son indicadores importantes de las diferencias entre los genotipos. Así, los mayores contenidos de humedad se relacionan con mayor capacidad para almacenar agua, mientras que menores contenidos de humedad se presentan en especies adaptadas a climas más húmedos. Considerando el uso del nopal como forraje, los contenidos elevados de fibra (FDN y FDA) son indeseables, lo que señala a *Opuntia ficus-indica* como una especie de menor calidad forrajera con respecto a *Nopalea cochenillifera*. Sin embargo, considerando el uso como nopalito, el alto contenido de fibra es deseable por su efecto en la digestión y absorción de los alimentos (Sáenz, 2004). En relación con lo anterior, sobresalen *O. ficus-indica*, *O. robusta* ssp. *larreyi* y *O. undulata* x *O. tomentosa* como especies con contenidos de fibra relativamente altos.

El factor genotipo fue significativo para la productividad, lo que confirmó la segunda hipótesis del presente estudio. Lo anterior coincide con lo encontrado por Calderón (1995), quien señala que las velocidades de crecimiento de tres cultivares de *Opuntia* creciendo en un medio homogéneo fueron distintas, y lo atribuyó a sus diferencias genéticas. Las especies más productivas fueron *O. undulata* x *O. tomentosa* y *O. robusta* ssp. *larreyi*, y fueron las únicas que se correlacionaron significativamente con la temperatura; es factible que esta correlación se deba a su capacidad de aclimatarse, como lo sugieren Downton *et al.* (1984). A pesar que la reacción general de las plantas a la hidroponía fue incrementar su productividad, el incremento de la productividad de *Opuntia* fue mayor que el de *Nopalea*. Las diferencias en la productividad pueden deberse al efecto de la temperatura sobre el crecimiento vegetal. Nobel y Hartsock (1981) señalan que las temperaturas para la actividad fisiológica óptima fueron distintas entre especies y que tales óptimos se relacionan con las condiciones térmicas de las regiones geográficas donde se distribuyen. Durante el periodo estudiado la oscilación térmica fue amplia (las medias de temperaturas máximas y mínimas fueron 35.6 y 11.3 °C,

respectivamente), lo que probablemente favoreció a *O. undulata* x *O. tomentosa* y *O. robusta* ssp. *larreyi*. De hecho, la amplitud de tolerancia térmica de estas especies con respecto a las de *O. ficus-indica* y *N. cochenillifera* es mayor. Lo anterior concuerda con los datos registrados por Downton *et al.* (1984), los cuales sugieren que las especies que durante su desarrollo han tolerado mayor amplitud de condiciones, se aclimatan mejor a condiciones extremas. Así, aunque no se haya reflejado en el análisis de correlación, es posible que por un lado, las temperaturas bajas hayan limitado el crecimiento de *N. cochenillifera*, a pesar de que las temperaturas altas le hayan sido favorables; y de manera opuesta, que las temperaturas altas hayan inhibido a *O. ficus-indica*, a pesar de que las temperaturas bajas le hayan sido favorables.

El factor estadio de crecimiento y la interacción de los factores estadio de crecimiento y especie sobre la productividad, también resultaron altamente significativos. Así, la productividad se incrementó directamente con el estadio de crecimiento; con lo anterior, es posible afirmar que la biomasa cosechada como nopalito siempre será menor que la cosechada como forraje. Estos resultados muestran que los rendimientos de nopalito señalados por otros autores pueden presentar una variabilidad amplia; lo anterior es correcto, si el criterio con el que se realizó la cosecha en dichos ensayos, se basó principalmente en tiempo. Adicionalmente, la calidad de los nopalitos y la calidad nutrimental de los cladodios generalmente disminuyen con el crecimiento (Rodríguez-Félix, 1988; Cantwell, 1992; Flores *et al.*, 1995). Algunos atributos, como la turgencia, el color y el brillo son más agradables a la vista cuando los nopalitos son más tiernos (como en los EC1). Es probable que por lo anterior, el precio al que se comercializan sea alto, algunas veces incluso el doble que el del nopalito más desarrollado. En general, la productividad al cosechar los brotes como nopalitos tiernos (EC1 y EC2) fue estadísticamente similar entre las especies de *Opuntia*. Sin embargo, López-Palacios *et al.* (2005) sí encontraron diferencias estadísticas en algunos atributos físicos y químicos de calidad de los nopalitos de *O. ficus-indica*, *O. undulata* x *O. tomentosa*, *O. robusta* ssp. *larreyi* y de *N. cochenillifera*, y concluyeron que el nopalito de *O. robusta* ssp. *larreyi* fue el de mejor calidad. De hecho, el nopalito de esta especie es el más aceptado en el centro y norte del estado de San Luis Potosí (Figueroa, 1984). Respecto al uso del nopal como forraje es importante considerar que si bien la proteína cruda del nopal disminuye directamente con el crecimiento a la cosecha, la productividad aumenta proporcionalmente.

Por lo anterior, la cantidad absoluta de PC proporcionada es mayor cuando se ofrecen cladodios desarrollados, lo que explica que los ganaderos utilicen como forraje principalmente los cladodios desarrollados (Flores y Aguirre, 1979).

LITERATURA CITADA

- Calderón P., N. 1995. Efecto de la salinidad en la producción de materia seca y absorción nutrimental de plantas micropropagadas de nopal (*Opuntia* spp.). Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México. 96 p.
- Cantwell, M. 1992. Aspectos de calidad y manejo postcosecha de nopalitas. En: S. Salazar; D. López (Eds.). Memoria del V Congreso Nacional y III Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México. p 110.
- Collins, M.; J.O. Fritz. 2003. Forage quality. In: R.F. Barnes; C. J. Nelson; M. Collins; K. J. Moore (Eds.). Forages. 6th ed. Iowa State Press. Ames, Iowa. USA. pp. 363-390.
- De Alba, J. 1971. Alimentación del ganado en América Latina. 2^a ed. La Prensa Médica Mexicana. México, D.F. México. 475 p.
- Downton, W.J.S.; J.A. Berry; J.R. Seemann. 1984. Tolerance of photosynthesis to high temperature in desert plants. *Plant physiology*. 74: 786-790.
- Figueroa H., F. 1984. Estudio de las nopaleras cultivadas y silvestres sujetas a recolección para el mercado en el altiplano potosino-zacatecano. Tesis de licenciatura. Escuela de Agronomía, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, SLP. México. 174 p.
- Flores H., A.; M. Murillo S.; F. Borrego E.; J.L. Rodríguez O. 1995. Variación de la composición química en estratos de la planta de 20 variedades de nopal. En: E. Pimienta B.; C. Neri L.; A. Muñoz V.; E.M. Huerta M. (Eds.). Memoria del VI Congreso Nacional y IV Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco. México. pp. 110-115.
- Flores V., C.A.; J.R. Aguirre R. 1979. El nopal como forraje. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México. 80 p.

- Gregory, R.A.; P. Felker. 1992. Crude protein and phosphorus contents of eight contrasting *Opuntia* forage clones. *Journal of Arid Environments*. 22: 323-331.
- López-Palacios, C.; H.M. Ramírez-Tobías; J.A. Reyes-Agüero; J.R. Aguirre-Rivera. 2005. Atributos físicos y pH en nopalitos. *Universitarios Potosinos*. 6: 22-25.
- Mcconn, M.M.; P.A. Nakata. 2004. Oxalate reduces calcium availability in the pads of the prickly pear cactus through formation of calcium oxalate crystals. *Journal of Agricultural Food and Chemistry*. 52: 1371-1374.
- Mondragón-Jacobo, C.; S de J. Méndez-Gallegos; G. Olmos-Oropeza. 2001. Cultivation of *Opuntia* for fodder production: from re-vegetation to hydroponics. In: C. Mondragón-Jacobo; S. Pérez-González (Eds.). *Cactus (Opuntia spp.) as forage*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. pp. 107-122.
- Nobel, P.S. 1983. Nutrient levels in cacti – relation to nocturnal acid accumulation and growth. *American Journal of Botany*. 70: 1244-1253.
- Nobel, P.S. 1998. *Los incomparables agaves y cactus*. Trillas. México, D.F. México. 211 p.
- Nobel, P.S.; T.L. Hartsock. 1981. Shifts in the optimal temperature for nocturnal CO₂ uptake caused by changes in growth temperature for cacti and agaves. *Physiologia Plantarum*. 53: 523-527.
- Nobel, P.S.; C.E. Russell; P. Felker; J. Galo M.; E. Acuña. 1987. Nutrient relations and productivity of prickly pear cacti. *Agronomy Journal*. 79: 550-555.
- Pinos-Rodríguez, J.M.; R. Duque-Briones; J.A. Reyes-Agüero, J.R. Aguirre-Rivera; S.S. González-Muñoz. 2003. Contenido de nutrientes en tres especies de nopal forrajero. En: G. Esparza F.; M.A. Sálas L.; J. Mena C.; R.D. Valdez C. (Eds.). *Memoria del IX Congreso Nacional y VII Congreso Internacional sobre Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal*. Universidad Autónoma Chapingo, Universidad Autónoma de Zacatecas e Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Zacatecas, Zac. México. pp. 60-63.
- Quesada M., A.; V. Valpuesta. 2000. Juvenilidad, senescencia y abscisión. En: J. Azcón-Bieto; M. Talón (Eds.). *Fundamentos de fisiología vegetal*. Mc. Graw Hill. Madrid, España. pp. 451-464.

- Revilla, G.; I. Zarra. 2000. La fisiología vegetal y su impacto social. La célula vegetal. En: J. Azcón-Bieto; M. Talón (Eds.). Fundamentos de fisiología vegetal. Mc. Graw Hill. Madrid, España. pp. 1-16.
- Rodríguez-Félix. A; M. Cantwell. 1988. Developmental changes in composition and quality of prickly pear cactus cladodes (nopalitos). *Plant Foods for Human Nutrition* 38: 83-93.
- Sáenz, C. 2004. Compuestos funcionales y alimentos derivados de *Opuntia* spp. En: G. Esparza-Fraustro; R.D. Valdez-Cepeda; S. de J. Méndez-Gallegos. (Eds.). El Nopal, tópicos de actualidad. Universidad Autónoma Chapingo – Colegio de Postgraduados. México. pp. 211-222.
- Sánchez del C., F.; E.R. Escalante R. 1983. Hidroponía. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México. 194 p.
- Thomas, H.; J.L. Stoddart. 1980. Leaf senescence. *Annual Review of Plant Physiology*. 34: 81-111.

Conclusiones generales

La productividad del nopal se relacionó directamente con el estadio de crecimiento del cladodio a la cosecha.

La calidad nutrimental del nopal se relacionó inversamente con el estadio de crecimiento, debido a la disminución del contenido de PC, al aumento de FDN, de FDA y de cenizas.

Probablemente el EC3 sea el estadio óptimo para un mejor aprovechamiento del forraje de nopal producido en hidroponía.

En general, las tres especies de *Opuntia* fueron más productivas que *Nopalea cochenillifera*, pero las características nutrimentales de esta última fueron mejores.

Como nopalito tierno (EC1), *Opuntia robusta* ssp. *larreyi* y *O. undulata* x *O. tomentosa* fueron las especies más productivas; como nopalito maduro (EC2) la productividad de las tres especies de *Opuntia* fue similar y mayor que la de *N. cochenillifera*.

Como forraje, las especies de *Opuntia* más productivas fueron *O. robusta* ssp. *larreyi* y *O. undulata* x *O. tomentosa*; la menos productiva fue *O. ficus-indica*. De estas, *O. robusta* ssp. *larreyi* presentó las mejores características nutrimentales, seguida de *O. undulata* x *O. tomentosa* y *O. ficus-indica*.

En las condiciones de este experimento, *O. undulata* x *O. tomentosa* y *O. robusta* ssp. *larreyi* destacaron como especies altamente productivas, sin embargo, la primera requirió mayor frecuencia en la cosecha. En contraste, *O. ficus-indica*, la especie menos productiva requirió una frecuencia de cosecha menor.

Las productividades de *O. undulata* x *O. tomentosa* y *O. robusta* ssp. *larreyi* se correlacionaron positiva y significativamente con las medias de temperaturas máximas. Además, *O. robusta* ssp. *larreyi* se correlacionó negativa y significativamente con las medias

de temperaturas mínimas. Las productividades de *O. ficus-indica* y *N. cochenillifera* carecieron de relación probable con la temperatura.

En general, la hidroponía incrementó la productividad y el contenido nutrimental de los nopales *Opuntia* y *Nopalea*.

Con la hidroponía, la productividad de *O. undulata* x *O. tomentosa*, *O. robusta* ssp. *larreyi* y *O. ficus-indica* puede ser hasta cinco veces mayor que la productividad registrada para nopal desarrollado en suelo a la intemperie, y su contenido de PC puede ser semejante al de la alfalfa.