



PROPORCIONES NUTRIMENTALES Y RENDIMIENTO EN *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill.

Valdez–Cepeda, R.D.^{1,2*}; Blanco–Macías, F.¹; Magallanes–Quintanar, R.³; Vázquez–Alvarado, R.E.⁴; Méndez–Gallegos, S.J.⁵; Troyo–Diéguez, E.⁶

¹Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional Universitario Centro–Norte. Zacatecas, Zac., México

²Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Matemáticas. Paseo Solidaridad s/n. Zacatecas, Zac., México

³Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica. Zacatecas, Zac., México

⁴Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía. Marín, Nuevo León, México

⁵Colegio de Postgraduados, Campus San Luis Potosí. Salinas de Hidalgo, SLP, México

⁶Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz, Baja California Sur, México

*Autor de contacto: vacrida@hotmail.com; Cruz del Sur Núm. 100, Col. Constelación, Apartado Postal 196, El Orito, Zacatecas, Zac., CP 98085, México; +52 492 9246147

RESUMEN

La especie *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. se cultiva en 25 países para cosechar sus frutos (tunas), tallos tiernos (nopalitos) y cladodios maduros. México es el único país con producción comercial de nopalitos de *O. ficus-indica* en 12,041 ha con rendimientos medios anuales de 9.03–99.93 t ha⁻¹ y un promedio de 64.33 t ha⁻¹. Ésta gran variación de los rendimientos medios anuales se asocia a una gran diversidad de sistemas de producción que difieren en cuanto a prácticas de manejo como la fertilización, una labor fuertemente relacionada con la satisfacción de los requerimientos nutrimentales de la especie cultivada. El balance nutrimental es un efecto indirecto de las interacciones nutrimentales sobre el rendimiento biótico o comercial. En este contexto, una base de datos (n = 360) del rendimiento (biomasa) y las concentraciones de los nutrientes N, P, K, Ca y Mg correspondientes a un experimento establecido en un Campo Experimental en El Orito, Zacatecas, México en abril de 1999 fue usada para identificar la dependencia del rendimiento sobre los nutrientes y las proporciones nutrimentales a través de coeficientes de correlación de Pearson. El rendimiento depende significativamente ($p \leq 0.05$) de las concentraciones de N, Mg, Ca y K en cladodios de un año de edad. Las proporciones K:In P, In Ca:In P y In Mg:In P tienen un efecto positivo sobre el rendimiento; mientras que las proporciones In P:In N, In Mg:In N y In N:In Ca afectan negativamente a la producción de biomasa.

PALABRAS CLAVE

nutrientes; proporciones nutrimentales; estequiometría.

INTRODUCCIÓN

La especie *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. se cultiva en 25 países para cosechar sus frutos (tunas), tallos tiernos (nopalitos) y cladodios maduros. México es el único país con producción comercial de nopalitos de *O. ficus-indica* en 12,041 ha con rendimientos medios anuales de 9.03–99.93 t ha⁻¹ y un promedio de 64.33 t ha⁻¹. Ésta gran variación de los rendimientos medios anuales se asocia a una gran diversidad de sistemas de producción que difieren en cuanto a prácticas de manejo como la fertilización, una labor fuertemente relacionada con la satisfacción de los requerimientos nutrimentales de la especie cultivada. Sin embargo, las cantidades de fertilizantes por aplicar para

mejorar las disponibilidades de nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) en el suelo son diversas y no consideran el cómo influyen sobre la absorción y el uso de los nutrientes por las plantas de *O. ficus-indica*.

Por lo general, el suplemento de un nutriente afecta la absorción y el uso de otros nutrientes, es decir, la interacción entre nutrientes ocurre en las plantas. Las interacciones nutricionales involucran iones cuyas propiedades químicas son lo suficientemente similares de manera que compiten por los sitios de adsorción, absorción, transporte y función sobre las superficies radicales o dentro de los tejidos vegetales. Tales interacciones son más comunes entre nutrientes de tamaño, carga, geometría de coordinación, y configuración electrónica similares (Robson y Pitman, 1983). Además, se sabe que las interacciones están influenciadas por factores como la concentración del nutriente, temperatura, intensidad de luz, aireación del suelo, humedad del suelo, pH del suelo, morfología de la raíz, tasa de transpiración de la planta, edad y tasa de crecimiento de la planta, especie vegetal y concentración de los nutrientes en la planta (*i.e.* composición). Por consiguiente, el conocimiento actual sobre causas y consecuencias de la variación de las concentraciones nutricionales en *O. ficus-indica* es limitado.

Los efectos de los nutrientes son típicamente determinados por los niveles de los nutrientes en el suelo y/o la planta (Drenovsky and Richards, 2004). Sin embargo, los experimentos de fertilización, aunque frecuentemente son sencillos, se desarrollan a largo plazo y requieren de trabajo intenso (van Duren y Petgel, 2000; Bennet y Adams, 2001). Como una alternativa a ese tipo de estudios, las proporciones nutricionales pueden ser usadas para elucidar que tan flexibles son dentro de una especie para predecir las limitaciones nutricionales y para identificar cómo esas proporciones cambian. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo fue identificar las relaciones entre el rendimiento de plantas de *O. ficus-indica* y las concentraciones de los nutrientes y sus proporciones en cladodios de un año de edad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Un experimento con *O. ficus-indica* se estableció el 16 de abril de 1999 en una sección del predio del 'Centro Regional Universitario Centro Norte' de la 'Universidad Autónoma Chapingo', situado cerca de la ciudad de Zacatecas, México. Las coordenadas geográficas del sitio experimental son: 22° 44' 49.6" latitud norte y 102° 46' 28.2" longitud oeste; mientras que la altitud es de 2,296 msnm (Blanco-Macías *et al.*, 2006). El clima característico de la región se clasifica como BS1kw(w) y corresponde a un clima seco, el menos seco de los BS, con una temperatura media anual que oscila entre 12 y 18°C y una precipitación media anual de 472 mm. La mayoría (65%) de la precipitación pluvial ocurre de junio a agosto.

Una muestra de suelo superficial (0–30 cm) se tomó y trató para realizar análisis físicos y químicos. Los resultados de los análisis del suelo indicaron que es de textura franca, con pH moderadamente alcalino (7.5) y alto contenido de materia orgánica (3.2%). Esto último se debe a que, durante más de 50 años, el predio se usó como huerta de árboles frutales (peral, ciruelo, manzano, entre otros) y el follaje, así como estiércol de bovino se incorporaban al suelo. La disponibilidad de N inorgánico es baja (15 mg kg⁻¹), la de P es muy alta (40.5 mg kg⁻¹), media la de K (230 mg kg⁻¹), alta la de Ca (4371 mg kg⁻¹), moderadamente alta la de Mg (569 mg kg⁻¹), moderadamente baja la de Fe (7.9 mg kg⁻¹), muy alta la de Cu (7.5 mg kg⁻¹), excesiva la de Zn (14.6 mg kg⁻¹), moderadamente baja la de Mn (6.1 mg kg⁻¹) y media la de B (1.6 mg kg⁻¹). La alta disponibilidad de Ca puede deberse a que el suelo es de origen calcáreo. El suelo es clasificado como Castañozem lúvico (según el sistema de clasificación de la FAO, modificado por la CETENAL, 1972) para las condiciones ambientales de México.

Un experimento se estableció al considerar las dosis de fertilización 0–0–0, 40–20–20, 80–40–40 y 120–80–80 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente, y tres variedades de nopal. Los 12 tratamientos se distribuyeron en el campo en tres bloques completos al azar. Con este esquema se ha inducido (Blanco-Macías, 2005; Blanco-Macías *et al.*, 2006) y se seguirá induciendo seguramente, heterogeneidad, en la composición del tejido vegetal y el rendimiento de las diferentes variedades de nopal, así como variabilidad espacial edáfica.

Todo el fertilizante se aplicó en julio de 1999. Del año 2000 en adelante el N se aplicó en dos fracciones: la primera mitad en primavera al iniciar la brotación y la segunda en el verano. El fósforo y el potasio se aplicaron en primavera al inicio de la primera brotación. La densidad empleada fue de 10,000 plantas ha⁻¹. Así, hubo 36 unidades experimentales. Cada unidad experimental constó de 12 plantas. Sin embargo, merece ser señalado que el demostrar efectos diferentes entre los tratamientos estuvo fuera del alcance de este estudio; lo que se pretendió corresponde al objetivo planteado.

En las 36 unidades experimentales con 12 plantas cada una, se cosecharon los cladodios de un año de edad a partir de febrero a marzo de cada año (2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006 y 2007); posteriormente, se pesaron para obtener el rendimiento medio expresado en términos de materia fresca por planta (kg Planta⁻¹). A todas las plantas se les practicó poda de formación, de manera que, a partir del año 2000, tuvieron la misma estructura: sobre la penca madre se desarrollaron 3 cladodios, sobre cada uno de éstos se desarrollaron 3; así la estructura fue de 13 cladodios por planta (Figura 1). El rendimiento consistió en la biomasa de los cladodios que se desarrollaron sobre los 13 cladodios de la estructura base.



Figura 1. Planta de *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. con la estructura base de 13 cladodios.

Cada año, desde 2001 hasta 2007, dentro de cada una de las 36 unidades experimentales se escogieron, al azar, una planta y, de ella, a un cladodio para realizar los análisis químicos con el fin de determinar las concentraciones de los nutrimentos N, P, K, Ca y Mg. En los años 2002, 2003 2004, el muestreo se duplicó y por tal razón se obtuvieron 360 cladodios como muestra. Los cladodios se lavaron con agua destilada. Después se deshidrataron en una estufa a 75 °C durante 36 horas hasta alcanzar peso seco constante; luego se molieron. Después, las concentraciones de los nutrimentos se cuantificaron con base en peso de materia seca. Las determinaciones se hicieron a través de técnicas convencionales después del proceso de digestión ácida de las muestras del tejido vegetal deshidratado. Los métodos empleados fueron (Blanco-Macías *et al.*, 2006): Kjeldahl (N); fotocolorimetría con molibdovanadato (P); espectrofotometría de absorción atómica (K, Ca y Mg).

La base de datos (n = 360) permitió saber que el rendimiento mostró una gran variabilidad (Coeficiente de variación, CV = 44.3%), al igual que N, Ca y Mg con CV de 46.5%, 36.5% y 27.6%, respectivamente. Las variabilidades de K y P pueden ser consideradas moderadamente altas con CV de 22.4% y 21%, respectivamente. La variabilidad es un aspecto importante cuando se identifica la composición nutrimental y sus consecuencias sobre el rendimiento y otros procesos. El rendimiento y las concentraciones nutrimentales pueden ser considerados como respuestas de la planta a factores bióticos y abióticos, especialmente a aquellos asociados con cambios a condiciones climáticas que

cambian cada año (estación de crecimiento) y a tratamientos de fertilización. Por tanto, esta base de datos puede ser usada para identificar las relaciones entre el rendimiento y los nutrientes y sus proporciones.

Los valores de las concentraciones de N, P, Ca y Mg se transformaron a logaritmo natural (ln) porque no se distribuyeron normalmente. Luego, cada relación bivariada se analizó para evaluar su confiabilidad y remover observaciones extrañas; de hecho, las observaciones ubicadas dentro de las colas, definidas por $\alpha = 0.025$ en cada distribución bivariada, fueron eliminadas. La base de datos reducida se usó para identificar relaciones entre nutrientes, y entre cada expresión nutrimental con el rendimiento mediante el coeficiente de correlación de Pearson.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las concentraciones medias (Cuadro 1) de N, P, Ca y Mg son mayores que las concentraciones óptimas en *O. ficus-indica* para producción de fruto reportadas por Claessens y Wessels (1997), probablemente debido a que las plantas corresponden a diferentes propósitos, ambientes y genotipos. Sin embargo, esas medias están comprendidas dentro de los rangos de suficiencia reportados para producción de biomasa por (Magallanes-Quintanar *et al.*, 2004, 2006; Blanco-Macías *et al.*, 2006, 2010). También, esos valores coinciden con las concentraciones en cladodios de plantas con grandes producciones de fruta en Argentina (Galizzi *et al.*, 2004).

Cuadro 1. Estadísticos básicos de rendimiento (materia fresca de cladodios, kg Planta⁻¹) y concentraciones (g kg⁻¹) de N, P, K, Ca y Mg en cladodios de un año de edad en *Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. (n = 250).

Estadístico	Rendimiento	ln N [†]	ln P [†]	K	ln Ca [†]	ln Mg [†]
Media	30.9	2.3 (10.0)	1.2 (3.4)	40.4	3.6 (36.7)	2.7 (14.6)
Desviación estándar	12.4	0.4 (1.5)	0.2 (1.2)	7.2	0.3 (1.4)	0.2 (1.2)
Coefficiente de variación (%)	40.1	17.4	16.7	17.8	8.3	7.4
Mínimo	6.4	1.4 (4.1)	0.8 (2.3)	26.0	2.9 (18.9)	2.2 (9.3)
Máximo	59.0	3.2 (23.3)	1.6 (5.0)	56.5	4.3 (74.3)	3.2 (24.2)

[†]Valores retransformados en paréntesis. Las expresiones nutrimentales que no se distribuyeron normalmente fueron transformadas a logaritmo natural para cubrir ese requisito.

Así entonces, el orden de requerimiento nutrimental es como se indica enseguida: K > Ca > Mg > N > P. Éste resultado coincide con el reportado en previos estudios (e.g. Blanco-Macías *et al.*, 2010). Por lo tanto, es notorio que la nutrición de esta especie es diferente a otras especies que se cultivan para producir fruta, verdura y forraje. En otras palabras, N y P pueden ser macronutrientes no tan importantes en esta especie como lo son en otras.

Las proporciones K:ln P, ln Ca:ln P y ln Mg:ln P presentaron una asociación positiva con el rendimiento; y por el contrario, ln P:ln N, ln Mg:ln N y ln Ca:ln N mostraron una relación negativa con la producción de biomasa. Estos resultados sugieren que la nutrición de las plantas de *O. ficus-indica* es compleja. Por ejemplo, es interesante que el N o el P participen en las proporciones que se correlacionan de manera significativa con el rendimiento y, por consiguiente, la proporción N:P es importante y que algunos desórdenes nutrimentales pueden ser debidos a una deficiencia de N. Esta última aseveración es conformada por coeficientes de correlación significativos ($p \leq 0.05$) entra cada uno de esos nutrientes y el rendimiento (0.292 para rendimiento vs. ln N y -0.278 para rendimiento vs. ln P: ln N, respectivamente).

Tan solo dos proporciones nutrimentales (ln Ca: ln N and ln Ca: ln P) se correlacionaron significativamente ($p \leq 0.05$) con el rendimiento. Llama la atención que la proporción Ca:N se asocia negativamente con el rendimiento, mientras que Ca:P lo hace de manera positiva. Tales resultados implican la posibilidad de un exceso de Ca o una deficiencia de N; pero también es posible una deficiencia de P con respecto a Ca. Un antagonismo entre Ca y N ha sido reportado por Blanco-Macías *et al.* (2006), sin embargo no puede vincularse a un efecto de dilución porque las plantas de *O. ficus-indica* tienden a acumular Ca en sus cladodios conforme incrementan su edad (Magallanes-Quintanar *et al.*, 2004). Es probable que las plantas absorbieran Ca en exceso debido a su gran disponibilidad en el suelo del sitio experimental, pero aún dentro del rango de suficiencia.

La secuencia de requerimiento evidenciada implica la siguiente proporción nutrimental general (N:P:K:Ca:Mg, con N ajustado a 100 como referencia) expresado con base en masa: 100:34:404:36:146. Esta proporción discrepa de las reportadas para fitoplancton y la mayoría de tipos de plantas terrestres. Por ejemplo, Knecht and Göranson (2004) reportaron la proporción general 100:14.3:68.3:8.3:8.7 para plantas herbáceas. Las diferencias pueden deberse a que se involucraron diferentes órganos o tejidos (hojas y cladodios). Sin embargo, tanto como las hojas como los cladodios son órganos en donde se realiza fotosíntesis. En trabajos de investigación futuros con *O. ficus-indica* se recomienda involucrar de manera conjunta a las referencias nutrimentales, crecimiento, rendimiento y estequiometría nutrimental.

CONCLUSIONES

El rendimiento de las plantas de *O. ficus-indica* se asoció de manera significativa con las concentraciones de N, Mg, Ca y K en cladodios de un año de edad. Las proporciones K:ln P, ln Ca:ln P y ln Mg:ln P se correlacionaron positiva y significativamente con el rendimiento; y por el contrario, las proporciones ln P:ln N, ln Mg:ln N and ln Ca:ln N lo hicieron negativamente.

AGRADECIMIENTOS

El 'Programa de Investigación en Fruticultura' de la Universidad Autónoma Chapingo financió parcialmente este trabajo mediante el proyecto clave PUI-FRU 10230308.

BIBLIOGRAFÍA

- Blanco-Macías, F., A. Lara-Herrera, R.D. Valdez-Cepeda, J.O. Cortés-Bañuelos, M. Luna-Flores y M.A. Salas-Luévano. 2006. Interacciones nutrimentales y normas de la técnica de nutrimento compuesto en nopal (*Opuntia ficus-indica* L. Miller). Revista Chapingo, Serie Horticultura 12(2): 165-175.
- Blanco-Macías, F., R. Magallanes-Quintanar, R.D. Valdez-Cepeda, R. Vázquez-Alvarado, E. Olivares-Sáenz, E. Gutiérrez-Ornelas, J.A. Vidales-Contreras, and B. Murillo-Amador. 2010. Nutritional reference values for *Opuntia ficus-indica* determined by means of the boundary-line approach. J. Plant Nutr. & Soil Sci. 173(6): 923-934.
- Bennet, L.T. and M.A. Adams. 2001. Response of perennial grassland to nitrogen and phosphorus additions in sub-tropical, semi-arid Australia. J. Arid Environ. 48: 289-308.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1972. Carta Edafológica. CETENAL, México.
- Claessens, A.S. and A.B. Wessels. 1997. The fertilizer requirements of cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) under summer rainfall conditions in South Africa. Acta Hort. 438: 83-95.
- Drenovsky, R.E. and J.H. Richards. 2004. Critical N:P values: Predicting nutrient deficiencies in desert shrublands. Plant and Soil 259: 59-69.
- Galizzi, F.A., P. Felker, C. González, and D. Gardiner. 2004. Correlations between soil and cladode nutrient concentrations and fruit yield and quality in cactus pears, *Opuntia ficus-indica*, in a traditional farm setting in Argentina. J. Arid Environ. 59: 115-132.
- Knecht, M.F., and A. Göranson. 2004. Terrestrial plants require nutrients in similar proportions. Tree Physiol. 24: 447-460.
- Magallanes-Quintanar, R., R.D. Valdez-Cepeda, F. Blanco-Macías, M. Márquez-Madrid, R.R. Ruiz-Garduño, O. Pérez-Veyna, J.L. García-Hernández, B. Murillo-Amador, J.D. López-Martínez, and E. Martínez-Rubín de Celis. 2004. Compositional nutrient diagnosis in nopal (*Opuntia ficus-indica*). J. Prof. Assoc. Cactus Develop. 6: 78-89.
- Magallanes-Quintanar, R., R.D. Valdez-Cepeda, F. Blanco-Macías, B. Murillo-Amador, J.L. García-Hernández, R.R. Ruiz-Garduño, M. Márquez-Madrid and F.J. Macías-Rodríguez. 2006. Nutrient interactions in cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) and their effect on biomass production. Acta Hort. 728: 145-150.
- Robson, A.D. and J.B. Pitman. 1983. Interactions Between Nutrients in Higher Plants. In: Lauchli, A., and R.L. Bielecki. (Eds.). *Inorganic Plant Nutrition: Encyclopedia of Plant Physiology Vol. 1*. Springer-Verlag. New York.
- van Duren, I.C. and D.M. Petgel. 2000. Nutrient limitations en wet, drained and re-wetted fen meadows: evaluation of methods and results. Plant & Soil 220: 35-47.