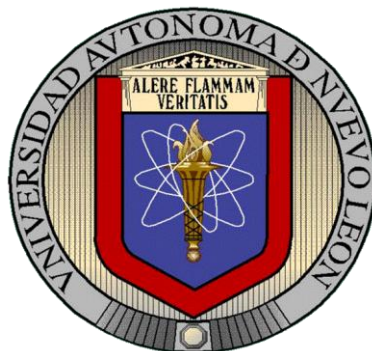


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**DETERMINACIÓN DE NORMAS NUTRIMENTALES**

**EN NOPAL (*Opuntia ficus-indica* L.)**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ORIENTACIÓN

EN AGUA-SUELO

PRESENTA

**FIDEL BLANCO MACÍAS**

**Escobedo, N. L., México**

**Agosto de 2010**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**DETERMINACIÓN DE NORMAS NUTRIMENTALES**

**EN NOPAL (*Opuntia ficus-indica* L.)**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

DOCTOR EN CIENCIAS AGRÍCOLAS CON ORIENTACIÓN

EN AGUA-SUELO

PRESENTA

**FIDEL BLANCO MACÍAS**

Escobedo, N. L., México


Agosto del 2010

**DETERMINACIÓN DE NORMAS NUTRIMENTALES  
EN NOPAL (*Opuntia ficus-indica* L.)**

Aprobación

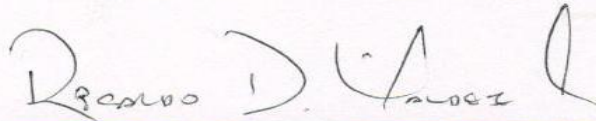
Comité Particular de Tesis

Asesores Principales:



---

Dr. Rigoberto E. Vázquez Alvarado



---

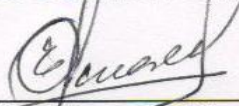
Dr. Ricardo David Valdez Cepeda

Coasesores:



---

Dr. Erasmo Gutiérrez Ornelas



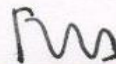
---

Dr. Emilio Olivares Sáenz



---

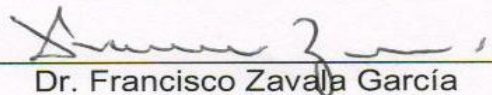
Dr. Juan Antonio Vidales Contreras



---

Dr. Rafael Magallanes Quintanar

Subdirector de Estudios de Posgrado e Investigación



---

Dr. Francisco Zavala García

## **DEDICATORIA**

### **A mi esposa, Laura Elena**

Por su apoyo y amor brindado en todo momento de nuestra vida diaria.

### **A mis hijos, Héctor, Karime y Jesús Josafat**

Máximos galardones de la vida, cuyas sonrisas y alegrías son fuente de inspiración.

### **A mis padres, Fidel y Beatriz**

A cuyo esfuerzo, dedicación y honradez debo mi formación humana y profesional.

### **A mis hermanos, Rosendo, Héctor<sup>†</sup>, Sergio, Luis Manuel, Juan José y Reyna Cristina**

De quienes he recibido su apoyo y comprensión.

### **A mis cuñados(as), sobrinos(as) y suegros con cariño y respeto.**

## AGRADECIMIENTOS

Al Pueblo y Gobierno de la República Mexicana, por el financiamiento recibido a través de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), para realizar mis estudios de doctorado.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, Institución que me brindó la oportunidad de obtener un postgrado a través de su División de Estudios de Posgrado e Investigación de la Facultad de Agronomía.

A mis maestros, al personal de campo y administrativo de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León, y en especial al Subdirector, Dr. Francisco Zavala García, por las facilidades y el apoyo otorgado.

Al Centro Regional Universitario Centro Norte de la Universidad Autónoma Chapingo por el apoyo brindado en mis estudios de Doctorado. En especial al Programa de Investigación en Fruticultura por el financiamiento del proyecto clave 09230308.

Al personal del Centro Regional Universitario Centro Norte de la Universidad Autónoma Chapingo que de manera directa e indirecta me brindó su apoyo para la realización de mis estudios.

En especial, al Dr. Ricardo David Valdez Cepeda por su apoyo incondicional y generoso, sus acertados consejos y por su atención y dedicación desinteresada durante la realización del presente trabajo de investigación.

Al Dr. Rigoberto E. Vázquez Alvarado, por sus atinados comentarios y sugerencias en la realización de mi trabajo de tesis.

Al Dr. Juan Antonio Vidales Contreras por las aportaciones y la revisión de este trabajo.

Al Dr. Erasmo Gutiérrez Ornelas por sus valiosas sugerencias, aportaciones atinadas y la revisión del borrador de tesis.

Al Dr. Emilio Olivares Saéñz por sus importantes aportaciones atinadas y la revisión del borrador de tesis.

Al Dr. Rafael Magallanes Quintanar por sus estimulantes sugerencias, recomendaciones y observaciones finales para mejorar la tesis.

A los amigos y compañeros estudiantes de la División de Estudios de Posgrado e Investigación: Pedro Almaguer S., Luis Samaniego M., Ramiro Rodríguez A., Rodolfo García Z., Blanca Adriana, Judith Arlette, Argelio Santos, José R. Martínez L., Francisco J. Piñera Ch. y Gilberto Rodríguez P., por su sincera confianza y todos los momentos vividos en las aulas de clase y el trabajo de campo.

## RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

### Fidel Blanco Macías

- Candidato a Doctor en Ciencias Agrícolas con Especialidad en Agua-Suelo.

### Tesis

- Determinación de Normas Nutrimientales en Nopal (*Opuntia ficus-indica* L).

### Áreas de estudio

- Producción Agrícola, Nutrición Vegetal y Productividad de Nopal

### Biografía

- Nacido el 5 de agosto de 1963 en la Exhacienda de San Mateo, Valparaíso, Zacatecas, México. Hijo de Beatriz Macías Pacheco y Fidel Blanco Rojas.

### Educación

- Egresado del Centro de Estudios Tecnológico Agropecuario No. 20 como Técnico Pecuario, en junio de 1983.
- Egresado de la Universidad Autónoma de Zacatecas, Facultad de Agronomía como Ingeniero Agrónomo Especialista en Fitotecnia, con Subespecialidad en Fitosanidad y Fitoproducción, en junio de 1992.
- Egresado de la Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Agronomía como Maestro en Ciencias en Producción Agrícola, en junio de 2005.

### Experiencia Profesional

- Técnico Académico de la Universidad Autónoma Chapingo. Centro Regional Universitario Centro Norte. El Orito, Zacatecas, México. Septiembre de 1985 a mayo de 1999.
- Profesor-Investigador de la Universidad Autónoma Chapingo. Centro Regional Universitario Centro Norte. El Orito, Zacatecas, México. Junio de 1999 a la fecha.
- Coordinador Regional del Taller de Investigación del Sistema-Producto Vaca Becerro. Zacatecas, Zacatecas, México. Julio de 1993 al septiembre de 1994.
- Coordinador de la Unidad Puntual de Vinculación del Centro Regional Universitario Centro Norte de la Universidad Autónoma Chapingo. Mayo de 2000 a septiembre de 2002.

## ÍNDICE GENERAL

	<b>Página</b>
ÍNDICE DE CUADROS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xi
SUMMARY	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	2
1.2. Hipótesis	2
2. REVISIÓN DE LITERATURA	3
3. MATERIALES Y MÉTODOS	10
3.1. Establecimiento del Experimento	10
3.2. Condiciones del Suelo del Sitio Experimental	10
3.3. Diseño Experimental	11
3.4. Registro de Variables	15
3.5. Estimación de Estándares con la Técnica Línea de Curva Límite	19
3.6. Identificación de Interacciones Nutrimentales	23
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
4.1. Estándares de la Técnica de Línea de Curva Límite	24
4.2. Comparación Entre Estándares de la Técnica Línea de Curva Límite y las Normas de Diagnóstico de Nutrimiento Compuesto	37
4.3. Interacciones Nutrimentales	39
5. CONCLUSIONES	43

6.	REFERENCIAS	45
	ANEXOS	52
	COMPARISON BETWEEN CND NORMS AND BOUNDARY-LINE APPROACH NUTRIENT STANDARDS: <i>Opuntia ficus-indica</i> L. CASE	+7
	ESTIMATION OF NUTRITIONAL VALUES FOR <i>Opuntia ficus-indica</i> L. BY MEANS OF THE BOUNDARY-LINE APPROACH	+24



## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1.	Normas de diagnóstico de nutrimento compuesto (DNC) (medias de logaritmo de proporción centrada (LPC) y desviación estándar, DE) para d=5 nutrientes de una subpoblación de alto rendimiento mayor a 46.7 kg Planta <sup>-1</sup> de materia fresca de los cladodios de un año de edad y concentraciones óptimas y rangos de suficiencia asociados (media±DE) para <i>Opuntia ficus-indica</i> L. (Blanco-Macías <i>et al.</i> , 2006).	5
2.	Propiedades del suelo de la parcela experimental (Blanco-Macías <i>et al.</i> , 2006).	8
3.	Matriz de tratamientos para el experimento en nopal ( <i>Opuntia ficus-indica</i> L.).	9
4.	Métodos empleados para determinar la concentración de los nutrientes en cladodios de nopal ( <i>Opuntia ficus-indica</i> L.).	13
5.	Estimadores estadísticos básicos de rendimiento (material fresco de cladodios, kg Planta <sup>-1</sup> ) y concentraciones de N, P, K, Ca y Mg (g kg <sup>-1</sup> ) en cladodios de <i>Opuntia ficus-indica</i> L. de un año de edad para la base de datos completa (n=360).	18
6.	Parámetros estadísticos de las funciones de segundo grado (Y=a+B <sub>1</sub> +B <sub>2</sub> X <sup>2</sup> ). X es el rendimiento (kg Planta <sup>-1</sup> ).	24
7.	Concentraciones óptimas y rangos de suficiencia estimados con	

	la técnica de curva límite para <i>Opuntia ficus-indica</i> L.	25
8.	Requerimiento de nutrimentos del nopal ( <i>Opuntia ficus-indica</i> L.) y rendimientos estimados al considerar una densidad de 10,000 plantas por hectárea. Se considera que la materia seca es el 5% de la materia fresca.	28
9.	Matriz de correlaciones de Pearson (r) entre los nutrimentos y el rendimiento en <i>Opuntia ficus-indica</i> L. no se consideraron observaciones con algún valor extraño, de manera que n=250.	32
10.	Matriz de correlaciones de Pearson (r) entre las interacciones nutrimentales y el rendimiento en <i>Opuntia ficus-indica</i> L. no se consideraron observaciones con algún valor extraño, de manera que n=250.	33

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura</b>		<b>Página</b>
1.	Distribución de los tratamientos en la parcela experimental.	10
2.	Planta de <i>Opuntia ficus-indica</i> L. con estructura de 3 y 9 cladodios sobre la penca madre.	12
3.	Los diferentes pasos de la técnica de línea de curva límite aplicada a la concentración de N y el rendimiento (kg Planta <sup>-1</sup> ) de <i>Opuntia ficus-indica</i> L.	19
4.	Relación entre la concentración de fósforo (P) y rendimiento (kg Planta <sup>-1</sup> ) de <i>Opuntia ficus-indica</i> L. en la cual se aprecia la función de segundo grado de la línea de curva límite.	20
5.	Relación entre la concentración de potasio (K) y rendimiento (kg Planta <sup>-1</sup> ) de <i>Opuntia ficus-indica</i> L. en la cual se aprecia la función de segundo grado de la línea de curva límite.	21
6.	Relación entre la concentración de calcio (Ca) y rendimiento (kg Planta <sup>-1</sup> ) de <i>Opuntia ficus-indica</i> L. en la cual se aprecia la función de segundo grado de la línea de curva límite.	22
7.	Relación entre la concentración de magnesio (Mg) y rendimiento (kg Planta <sup>-1</sup> ) de <i>Opuntia ficus-indica</i> L. en la cual se aprecia la función de segundo grado de la línea de curva límite.	23

## RESUMEN

La especie *Opuntia ficus-indica* L. se cultiva en 25 países por sus frutas ('tunas'), cladodios jóvenes o 'nopalitos' (tallos) y cladodios maduros. México es el único país con producción comercial de 'nopalitos' de *O. ficus-indica* L. y se cultiva en 12,041 ha. La producción fue de 728,940 ton en 2009, con rendimientos promedio a nivel anual que varían desde 3.09 hasta 99.93 ton ha<sup>-1</sup>, y un promedio general de 64.33 ton ha<sup>-1</sup>. Esta gran variabilidad del rendimiento medio anual está asociada a una gran diversidad de sistemas agrícolas que difieren en cuanto a las prácticas de manejo del cultivo, tales como la fertilización, labor estrechamente vinculada a satisfacer los requerimientos nutrimentales de las especies cultivadas. Normas preliminares para *O. ficus-indica* L. se han desarrollado con la técnica de diagnóstico de nutrimento compuesto (DNC); sin embargo, se desconoce su confiabilidad. En ese sentido, una base de datos (n=360) de rendimiento (biomasa) y concentración de los nutrimentos N, P, K, Ca y Mg, generada en un experimento establecido en abril de 1999, en El Orito, Zacatecas se usó con el objetivo de desarrollar los estándares nutrimentales mediante la línea o curva límite y compararlos con las normas de DNC, ya reportadas en la literatura científica para determinar su confiabilidad. El coeficiente de correlación de Pearson se involucró, también, con el objetivo de identificar interacciones nutrimentales significativas. La línea límite se ajustó a una función de segundo grado para los casos de N, P, K, Ca y Mg. Los estándares de la técnica de línea límite para *Opuntia ficus-indica* L. son: N=13.07 g kg<sup>-1</sup>, P=3.19 g kg<sup>-1</sup>, K=44.39 g kg<sup>-1</sup>, Ca=38.09 g kg<sup>-1</sup> y Mg=17.29 g kg<sup>-1</sup>; mientras que los rangos de suficiencia a 95% de rendimiento son 8.41–20.28 g kg<sup>-1</sup> para N, 2.44–4.22 g kg<sup>-1</sup> para P, 38.23–

50.76 g kg<sup>-1</sup> para K, 31.82–45.15 g kg<sup>-1</sup> para Ca y 14.3–20.91 g kg<sup>-1</sup> para Mg. Los valores inferior y superior de los rangos de suficiencia a 95% de rendimiento son tan confiables como las normas nutrimentales desarrolladas con la técnica de DNC. El rendimiento es dependiente ( $p \leq 0.05$ ) de las concentraciones de los nutrimentos N, Mg, Ca y K en cladodios de un año de edad. Las interacciones entre K y P, Ca y P, y Mg y P tienen un efecto positivo sobre el rendimiento. Las interacciones entre P y N, Mg y N, Ca y N afectan negativamente la producción de biomasa.

Firma de los Asesores Principales:

Dr. Rigoberto E. Vázquez Alvarado

Dr. Ricardo David Valdez Cepeda

## SUMMARY

The species *Opuntia ficus-indica* L. is growing in 25 countries for its fruit (cactus pear), young cladodes (stems or 'nopalitos') and mature cladodes. Mexico is the only country with commercial production of 'nopalitos' of *O. ficus-indica* L. covering 12.041 ha. The production was 728.940 ton in 2009, with annual mean yields ranging from 09.03 to 99.93 ton ha<sup>-1</sup>, and an overall average of 64.33 ton ha<sup>-1</sup>. This great variability of annual mean yield is associated with a wide range of farming systems that differ in terms of crop management practices such as fertilization, a labor closely related to satisfy the nutritional requirements of cultivated species. Preliminary nutrient norms for *O. ficus-indica* L. have been developed through the compositional nutrient diagnosis (CND) approach, however, it is unknown their reliability. In this regard, a database (n = 360) of yield (biomass) and nutrient concentrations of N, P, K, Ca and Mg from an experiment established at El Orito, Zacatecas, Mexico during April 1999 and carried out on, was used to develop nutritional standards through the boundary-line technique and compared with CND norms, as reported in the scientific literature to determine its reliability. The Pearson correlation coefficient was involved, too, with the aim of identifying significant nutrient interactions. Second-degree functions adjusted the boundary lines in the cases of N, P, K, Ca and Mg. The standards of the boundary-line approach for *O. ficus-indica* L. are N = 7.13 g kg<sup>-1</sup>, P = 3.19 g kg<sup>-1</sup>, K = 44.39 g kg<sup>-1</sup>, Ca = 38.09 g kg<sup>-1</sup> and Mg = 17.29 g kg<sup>-1</sup>, whereas the sufficiency ranges to 95 % yield are 8.41–20.28 g kg<sup>-1</sup> for N, 2.44–4.22 g kg<sup>-1</sup> for P, 38.23–50.76 g kg<sup>-1</sup> for K, 31.82–45.15 g kg<sup>-1</sup> for Ca and 14.3–20.91 g kg<sup>-1</sup> for Mg. The lower and higher values of the sufficiency ranges to 95% yield are as reliable as nutrient norms developed through the CND approach. Yield is significantly ( $p \leq 0.05$ )

dependent of N, Mg, Ca and K concentrations in cladodes of one-year old. The interactions between K and P, Ca and P, and Mg and P have a positive effect on yield. Interactions between P and N, Mg and N, N Ca and negatively affect the production of biomass.

Main Advisors Signature:

Dr. Rigoberto E. Vázquez Alvarado

Dr. Ricardo David Valdez Cepeda

## 1. INTRODUCCIÓN

La especie *Opuntia ficus-indica* L. es una *Platyopuntia* nativa de las regiones templadas semiáridas de México. A nivel comercial es importante, pues se cultiva en 25 países por sus frutas ('tunas'), cladodios jóvenes o 'nopalitos' (tallos) y cladodios maduros. Los frutos se destinan para consumo en fresco y a la elaboración de queso de tuna, melcocha, miel y vino, entre otros productos. Los cladodios jóvenes se usan como verdura para elaborar ensaladas y guisos especiales. Los cladodios maduros se emplean como forraje, principalmente en la época de estiaje (Pimienta, 1990). Las plantaciones comerciales de nopal para producir fruta y verdura han aumentado considerablemente en los estados de Zacatecas, Aguascalientes, San Luis Potosí, Guanajuato, Jalisco y Estado de México (Barrientos, 1990).

México es el único país con producción comercial de 'nopalitos' de *O. ficus-indica* L. Esta especie se cultiva con dicho propósito en 12,041 ha (SAGARPA-SIAP, 2010). La producción fue de 728,940 ton en 2009, con rendimientos promedio a nivel anual que varían desde 3.09 hasta 99.93 ton ha<sup>-1</sup>, y un promedio general de 64.33 ton ha<sup>-1</sup> (SAGARPA-SIAP, 2010). Esta gran variabilidad del rendimiento medio anual está asociada a una gran diversidad de sistemas agrícolas que difieren en cuanto a las prácticas de manejo del cultivo, tales como la fertilización, labor estrechamente vinculada a satisfacer los requerimientos nutrimentales de las especies cultivadas. Sin embargo, las cantidades de fertilizante aplicado para mejorar la disponibilidad de nitrógeno, fósforo y potasio en el suelo son diversas y no se ha tomado en cuenta cómo influyen sobre la composición de algún tejido de referencia y el rendimiento. También, normas preliminares para *O. ficus-indica* L.



se han desarrollado con la técnica de diagnóstico de nutrimento compuesto (DNC) (Blanco–Macías *et al.*, 2006); sin embargo, se desconoce su confiabilidad.

Por consiguiente, en la presente tesis se plantearon los objetivos e hipótesis descritos enseguida.

### **1.1. Objetivos**

- i) Estimar los estándares nutrimentales de N, P, K, Ca y Mg, así como sus rangos de suficiencia, asociados al 95% de rendimiento máximo, para nopal al usar la técnica de línea de curva límite o envolvente.
- ii) Comparar las normas nutrimentales de nopal estimadas con las técnicas de línea de curva límite y diagnóstico de nutrimento compuesto.
- iii) Identificar interacciones significativas entre nutrimentos y su relación con el rendimiento del cultivo de nopal.

### **1.2. Hipótesis**

- i) Una base de datos pequeña (>300 observaciones) de composición de tejido vegetal y rendimiento, permite estimar concentraciones y rangos de suficiencia de los nutrimentos N, P, K, Ca y Mg en cladodios de nopal con fines de producción de biomasa mediante la técnica de línea curva límite o envolvente.
- ii) Las normas nutrimentales en nopal se obtienen a través de diferentes técnicas, por lo tanto, la técnica de nutrimento compuesto y de línea de curva límite ofrecen esta posibilidad y sus resultados son comparables.
- iii) Una base de datos pequeña (>300 observaciones) de composición de tejido vegetal y rendimiento en nopal permite identificar correlaciones bivariadas entre nutrimentos (N, P, K, Ca y Mg) y el rendimiento, lo cual implica que es factible la identificación de sinergismos y antagonismos significativos.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

La cantidad de fertilizante usado en la producción de nopal comestible (*O. ficus-indica* L.) es variable y puede llegar a 800 ton ha<sup>-1</sup> (4 ton ha<sup>-1</sup> de N) de estiércol fresco de vacuno (Fernández *et al.*, 1992; Murillo *et al.*, 1999). Herrera y Alejandre (1992) señalaron que, durante los primeros meses después de la plantación, se recomienda incorporar al suelo una capa de aproximadamente 5 cm de estiércol de vaca. Con el fin de obtener producción a los seis meses después de plantar es necesario fertilizar con 2 ton ha<sup>-1</sup> de urea (920 kg ha<sup>-1</sup> de N): la mitad al inicio y el resto al final de la temporada de lluvias (Borrego y Burgos, 1986).

En el caso del nopal cultivado para producción de tuna, nopalito (verdura) y penca para consumo animal y propagación vegetativa, los estudios de fertilización y nutrición son relativamente pocos en comparación con especies como el maíz, frijol, soya, papa, duraznero y guayabo, entre otros. En general, las dosis de fertilización aplicadas en parcelas de nopal han sido diferentes (N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O) por ejemplo: 160-0-0 (Nobel *et al.*, 1987), 20-0-0 y 40-0-0 (Mondragón y Pimienta, 1990), 30-0-0, 60-0-0, 120-0-0 y 60-20-35 (Nerd y Mizrahi, 1992) y 224-0-0 y 224-112-00 (González y Everitt, 1990).

Baca (1988) informó una estrecha relación entre la falta de brotación y deficiencias de N, P y Ca. La acumulación de nitratos (40 a 50 mg g<sup>-1</sup> de materia seca) superior a 1.4 g kg<sup>-1</sup> de materia fresca, en plantas de *O. ficus-indica* L. de 2 a 3 años de edad, estimula la brotación de nuevos órganos (Nerd y Nobel, 1995). Gathaara *et al.* (1989), Magallanes-Quintanar *et al.* (2004, 2006ab), Felker *et al.* (2005) y Blanco-Macías *et al.* (2006) han reportado interacciones nutrimentales en *O. ficus-indica* L. Sin embargo, la mayoría de estos estudios no se llevaron a cabo

teniendo en cuenta normas o estándares de diagnóstico nutrimental asociadas a un determinado rendimiento, salvo los casos de Magallanes–Quintanar *et al.* (2006ab).

Galizzi *et al.* (2004) encontraron que la concentración de N en los cladodios estuvo correlacionada significativamente con las concentraciones de los nutrientes Ca, Cu, K, Mn y Zn, en ese orden. Un tratamiento de fertilización con N no estimuló las concentraciones de los micronutrientes en los cladodios, la alta correlación entre los nutrientes N y Cu, Mn y Zn pueden indicar limitaciones micronutrientales. Dado que las proporciones de Ca/N y K/N son mayores en *Opuntia* que en otros cultivos y que la correlación entre el rendimiento y el calcio intercambiable del suelo fue significativa, la importancia de los macronutrientes Ca y K ha sido desapercibida; por consiguiente, debe darse prioridad a esos nutrientes en el contexto del rendimiento y la calidad del fruto de *O. ficus–indica* L.

Correlaciones positivas significativas entre el rendimiento y la concentración de los nutrientes K, Ca y Mg en cladodios de un año de edad fueron reportadas por Magallanes–Quintanar *et al.* (2006b). A pesar de que el N y el P no se correlacionaron significativamente con el rendimiento, la interacción N/P tuvo un efecto positivo sobre la producción de biomasa; mientras que la proporción P/Ca la afectó negativamente (Magallanes–Quintanar *et al.*, 2006b). Si los nutrientes y/o las interacciones no se asocian al rendimiento de manera significativa, el diagnóstico tiene un uso limitado con el fin de corregir los desórdenes nutrimentales al aplicar fertilizantes y así modificar la fertilidad del suelo y satisfacer los requerimientos nutrimentales del cultivo, pues se desconoce si el desorden se asocia a insuficiencia o exceso de algún nutriente.

El mejoramiento de la fertilidad de suelo y el uso eficiente de los nutrimentos por las plantas cultivadas son aspectos de gran importancia ecológica y económica. Por lo tanto, el desarrollo y la aplicación de las prácticas culturales precisas, que aseguren una fuente adecuada y balanceada de nutrimentos a las plantas cultivadas, conforman una área prioritaria de investigación. Un diagnóstico correcto y el mejoramiento del estado nutrimental de las plantas proporcionan valiosos impactos, ya que no sólo se benefician la sanidad y la calidad de las plantas, sino también la nutrición de los animales y los seres humanos. Existen varios ejemplos que muestran que las plantas con un nivel balanceado de nutrimentos se adaptan mejor a factores de estrés biótico y abiótico, tales como enfermedades fungosas, toxicidad por metales y sales, foto-oxidación causada por bajas temperaturas, sequía y alta irradiación (Loneragan, 1997; Cakmak, 2000).

Entonces, es importante saber cuando el o los nutrimento(s) implicado(s) se constituye(n) como factor(es) limitativo(s) (Dow y Roberts, 1982) y en qué magnitud difieren de las concentraciones óptimas y/o rangos de suficiencia de los nutrimentos. Es imprescindible realizar un diagnóstico correcto e implementar la práctica de fertilización conveniente para el mejoramiento del estado nutrimental de las plantas cultivadas.

En muchas especies se han definido concentraciones óptimas, niveles críticos y rangos de suficiencia de los nutrimentos minerales que se relacionan con el rendimiento e interacciones nutrimentales que afectan la respuesta de las plantas. En diagnósticos del estado nutrimental, el análisis de tejidos vegetales se ha utilizado porque la composición de la planta es un indicador de respuesta de la

planta más sensible que el rendimiento. Sin embargo, es más difícil de explicar (Melsted *et al.*, 1969). Algunas de las técnicas más usadas para diagnosticar el estado nutrimental de las plantas son valor crítico, VC (Bates, 1991); sistema integrado de diagnóstico y recomendación, SIDR (Walworth y Sumner, 1987) y diagnóstico de nutrimento compuesto, DNC (Parent y Dafir, 1992).

En el caso de la técnica de VC, una muestra de alto rendimiento se define de manera arbitraria, generalmente al considerar el 90 o 95% del rendimiento máximo y se supone que, excepto el nutrimento del caso, los demás están en cantidades suficientes y no excesivas. En las técnicas SIDR y DNC, la población de altos rendimientos se selecciona de manera diferente. Con respecto al SIDR, no se ha establecido un procedimiento formal para dividir las observaciones en dos grupos: uno de alto rendimiento y otro de bajo rendimiento. Por el contrario, esa partición se logra con la técnica del DNC y se sustenta en la función de distribución de chi-cuadrada ( $\chi^2$ ) de los índices de nutrición global y en la relación cúbica entre los rendimientos y las funciones de proporción de varianza acumulada (Parent y Dafir, 1992). En otras palabras, la técnica DNC se sustenta en procedimientos estadísticos robustos.

Con la técnica de DNC se consideran los efectos de la naturaleza multivariada de las interacciones nutrimentales ya que se asegura que la variación de un solo elemento en el tejido vegetal inevitablemente cambia la proporción de los otros elementos. Este método permite calcular las proporciones multivariadas nutrimentales que son más representativas de la composición natural (Aitchison, 1986) de los tejidos vegetales. La técnica de DNC ha sido probada en cultivos

anuales (Parent *et al.*, 1993; Parent *et al.*, 1994; Khiari *et al.*, 2001ab) y en especies perennes (Magallanes–Quintanar *et al.*, 2004; Vizcaíno–Soto y Côté, 2004; Blanco–Macías, 2005; Blanco–Macías *et al.*, 2006; Quesnel *et al.*, 2006).

Blanco–Macías (2005) y Blanco–Macías *et al.* (2006) propusieron normas nutrimentales para nopal (*O. ficus–indica* L.). Esos estándares (Cuadro 1) fueron calculados usando la técnica DNC, descrita por Parent y Dafir (1992), Khiari *et al.* (2001ab), García–Hernández *et al.* (2004), Magallanes–Quintanar *et al.* (2004), García–Hernández *et al.* (2005), Blanco–Macías (2005), Magallanes–Quintanar *et al.* (2006b) y Blanco–Macías *et al.* (2006). Las normas DNC consignadas (Cuadro 1) son las desviaciones estándar y las medias de los logaritmos de las proporciones de varianza acumulada  $V_N^*$ ,  $V_P^*$ ,  $V_K^*$ ,  $V_{Ca}^*$ ,  $V_{Mg}^*$  y  $V_{Rd}^*$ , asociadas a una subpoblación de alto rendimiento ( $>46.7$  kg Planta<sup>-1</sup>), expresado en materia fresca. Las concentraciones óptimas de los nutrimentos y sus desviaciones estándar asociadas a dichas normas se aprecian también en el Cuadro 1. Sin embargo, subyace la duda sobre si esas normas son correctas o no. De manera que si se reconoce la necesidad de desarrollar normas nutrimentales correctas, es conveniente mejorar o asegurar la confiabilidad de las ya determinadas.

Existen varias formas para definir si las normas nutrimentales son confiables o no. Una de ellas es modificarlas al incrementar la base de datos. También, los nuevos valores óptimos se pueden determinar con otras técnicas tales como análisis de regresión de las relaciones entre el índice del sitio y la concentración del nutrimento (en el follaje) de varios sitios a nivel local o regional (Quesnel *et al.*, 2006). Otra manera consiste en contrastar los estándares nutrimentales derivados

con diversas técnicas. Mediante el uso de esta estrategia, Vizcaíno–Soto y Côté (2004) encontraron que los estándares nutricionales desarrollados con la técnica de línea de curva límite (LCL) para el arce o maple sacarino (*Acer saccharum* Marsh) son comparables a los previamente calculados con la técnica de DNC. Entonces, es conveniente contrastar las normas nutrimentales para *O. ficus–indica* L. propuestas por Blanco–Macías *et al.* (2006) con otros estándares estimados mediante al menos otra técnica diferente.

Cuadro 1. Normas de diagnóstico de nutriente compuesto (DNC) (medias de logaritmo de proporción centrada (LPC) y desviación estándar, DE) para  $d=5$  nutrientes de una subpoblación de alto rendimiento mayor a  $46.7 \text{ kg Planta}^{-1}$  de materia fresca de los cladodios de un año de edad y concentraciones óptimas y rangos de suficiencia asociados (media $\pm$ DE) para *Opuntia ficus-indica* L. (Blanco-Macías *et al.*, 2006).

Normas nutrimentales de DNC			Nutriente	Concentración óptima ( $\text{g kg}^{-1}$ )	Rango ( $\text{g kg}^{-1}$ )
Norma (LPC)	Media	DE			
$V_N^*$	-0.98	0.35	N	12.9	8.2–17.6
$V_P^*$	-2.23	0.21	P	3.6	2.8–4.4
$V_K^*$	0.25	0.19	K	42.4	33.6–51.2
$V_{Ca}^*$	0.37	0.35	Ca	42.9	32.3–66.9
$V_{Mg}^*$	-0.71	0.17	Mg	16.1	13.4–18.8
$V_{R_s}^*$	3.29	0.09			



### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. Establecimiento del Experimento**

Un experimento con *O. ficus-indica* L. 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, 2005). 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 mayor parte (65%) de la precipitación pluvial ocurre de junio a agosto.

#### **3.2. Condiciones del Suelo del Sitio Experimental**

Una muestra de suelo superficial (0–30 cm) se tomó y trató para realizar análisis físicos y químicos. Los resultados del análisis del suelo de la parcela experimental mostraron que es de textura franca, con pH moderadamente alcalino y alto contenido de materia orgánica (Cuadro 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, la de P es muy alta, media la de K, alta la de Ca, moderadamente alta la de Mg, moderadamente baja la de Fe, muy alta la de Cu, excesiva la de Zn, moderadamente baja la de Mn y media la de B. 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.

### **3.3. Diseño Experimental**

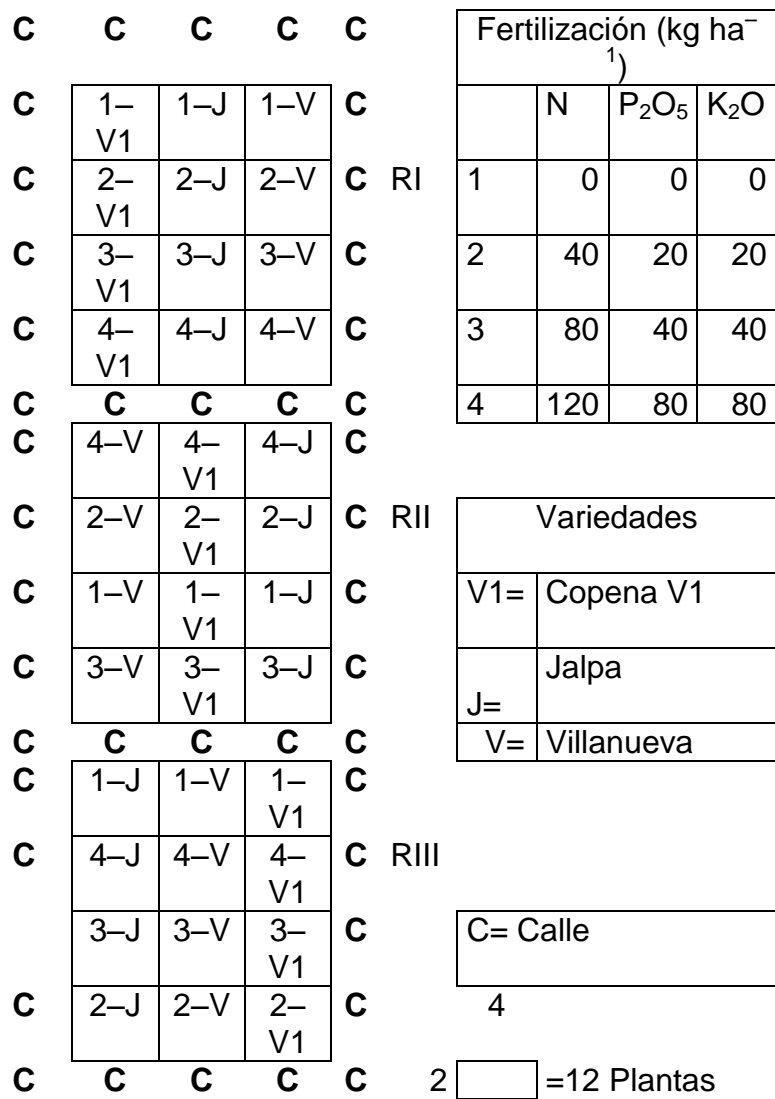
El experimento se llevó a cabo con el fin de inducir heterogeneidad utilizando cuatro tratamientos de fertilización sobre el rendimiento de *O. ficus-indica* L. Los factores de estudio fueron variedades y fertilización. Las variedades fueron: “Jalpa”, “Villanueva” y “COPENA V-1”; las dosis de fertilización: 00–00–00, 40–20–20, 80–40–40 y 120–80–80 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y K<sub>2</sub>O, respectivamente; las fuentes fueron urea, superfosfato de calcio triple y cloruro de potasio. La combinación de esos niveles dio como resultado 12 tratamientos (Cuadro 3) distribuidos en el campo en parcelas divididas dentro de tres bloques completos al azar (Figura 1).

Cuadro 2. Propiedades del suelo de la parcela experimental (Blanco–Macías *et al.*, 2006).

Nutrimiento/Factor	Cantidad	Interpretación de la disponibilidad del nutrimento	Método
pH	7.50	Muy ligeramente alcalino	Medidor de pH (Suelo:agua, 1:2)
Materia Orgánica (%)	3.23	Alto	Walkley y Black
N–Inorgánico (mg kg <sup>-1</sup> )	15.00	Baja	Extraído con KCl 2N, determinado por flujo de vapor
P (mg kg <sup>-1</sup> )	40.50	Muy alta	Olsen
K (mg kg <sup>-1</sup> )	230.00	Media	Extraído usando acetato de amonio y determinado por espectrofotometría
Ca (mg kg <sup>-1</sup> )	4371.00	Alta	Extraído usando acetato de amonio y determinado por espectrofotometría
Mg (mg kg <sup>-1</sup> )	569.00	Moderadamente alta	Extraído usando acetato de amonio y determinado por espectrofotometría
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	7.85	Moderadamente baja	Extraído usando DTPA, proporción 1:4, determinado por espectrofotometría atómica
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	7.47	Muy alta	Extraído usando DTPA, proporción 1:4, determinado por espectrofotometría atómica
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	14.60	Excesiva	Extraído usando DTPA, proporción 1:4, determinado por espectrofotometría atómica
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	6.13	Moderadamente baja	Extraído usando DTPA, proporción 1:4, determinado por espectrofotometría atómica
B (mg kg <sup>-1</sup> )	1.59	Media	Extraído con CaCl <sub>2</sub> 1.0 M, determinado por fotocolorimetría
Arena (%)	32.20	Textura franco arcillosa	Hidrómetro de Bouyoucos
Limo (%)	41.60		Hidrómetro de Bouyoucos
Arcilla (%)	26.20		Hidrómetro de Bouyoucos

Cuadro 3. Matriz de tratamientos para el experimento en nopal (*Opuntia ficus-indica* L.).

Tratamiento	Variedad	Dosis de fertilización (N-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -K <sub>2</sub> O)
1	Jalpa	00-00-00
2	Jalpa	40-20-20
3	Jalpa	80-40-40
4	Jalpa	120-80-80
5	Villanueva	00-00-00
6	Villanueva	40-20-20
7	Villanueva	80-40-40
8	Villanueva	120-80-80
9	Copena V-1	00-00-00
10	Copena V-1	40-20-20
11	Copena V-1	80-40-40
12	Copena V-1	120-80-80



RI = Repetición 1, RII = Repetición 2, RIII = Repetición 3

Figura 1. Distribución de los tratamientos en la parcela experimental.

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<sup>-1</sup>. 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 está fuera del alcance de este estudio, lo cual se aprecia en los objetivos e hipótesis planteados.

#### **3.4. Registro de Variables**

De las 36 unidades experimentales de 12 plantas cada una, se cosecharon los cladodios de un año de edad a partir de febrero a marzo de cada año (del 2001 al 2007); posteriormente, se pesaron para obtener el rendimiento medio expresado en términos de materia fresca por planta (kg Planta<sup>-1</sup>). A todas las plantas se les practicó poda de formación, de manera que, a partir del año 2000, tuvieron la misma estructura (Figura 2); Así en cada planta se mantuvieron tres cladodios sobre la penca madre, y luego tres cladodios sobre cada una de ellas. El rendimiento consistió en la biomasa de los cladodios que se desarrollaron sobre dicha estructura de 13 cladodios (en la Figura 2 se aprecian las cicatrices de los cladodios removidos).

Dentro de cada una de las 36 unidades experimentales se escogió a 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 y 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. Posteriormente, se cuantificaron las concentraciones de los nutrimentos con base en peso de materia seca en el Laboratorio de Servicio de la Universidad Autónoma Chapingo. 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); fotolorimetría con molibdovanadato (P); espectrofotometría de absorción atómica (K, Ca y Mg) (Cuadro 4).



Figura 2. Planta de *Opuntia ficus-indica* L. con estructura de 3 y 9 cladodios sobre la penca madre.



Cuadro 4. Métodos empleados para determinar la concentración de los nutrimentos en cladodios de nopal (*Opuntia ficus-indica* L.).

Nutrimento(s)	Método empleado
N	Kjeldahl.
P	Digestado con una mezcla diácida y determinado por fotocolorimetría con molibdovanadato.
K, Ca y Mg	Digestado con una mezcla diácida y determinados por espectrofotometría de absorción atómica.

### 3.5. Estimación de Estándares con la Técnica Línea de Curva Límite

Los estándares de la técnica de línea de curva límite (LCL) fueron desarrollados al considerar una base de datos ( $n=360$ ) de las concentraciones de N, P, K, Ca y Mg en cladodios de un año de edad de nopal (*O. ficus-indica* L.) y de materia fresca de cladodios como rendimiento. El principio de la técnica de LCL fue descrito por Web (1972). Originalmente se usó para determinar los valores críticos o balances de nutrimentos en modelos de diagnóstico nutrimental en plantas (Møller-Nielsen y Frijs-Nielsen, 1976; Fraser y Eaton, 1983; Walworth *et al.*, 1986). Luego, la LCL se aplicó para describir la relación entre las concentraciones de los nutrimentos del suelo y los rendimientos de las plantas (Evanlyo y Sumner, 1987; Evanylo, 1990).

La línea límite puede ser interpretada en términos de la ley del mínimo de von Liebig. Con tal consideración, la variable dependiente  $y$  es modelada como respuesta a  $p$  variables independientes  $x_i$ :

$$y = \min\{f_1(x_1), f_2(x_2), \dots, f_p(x_p, y_{max})\}, \quad (1)$$

donde  $f_i(x_i)$  representa el efecto limitante de la  $i$ ésima variable independiente y  $y_{max}$  es alguna respuesta máxima (*i.e.* un rendimiento máximo intrínseco o de sitio). En este caso,  $\min\{f_i(x_i), y_{max}\}$  pudiera definir el límite envolvente (superior) para  $(y, x_i)$ .

Otra interpretación posible, considera a la línea límite como la función de tasa limitante en un modelo multiplicativo:

$$y = f_1(x_1) \cdot f_2(x_2) \cdot \dots \cdot f_p(x_p) \cdot y_{max}, \quad (2)$$

de manera que  $y_{max}$  es la respuesta máxima, y las  $f_i(x_i)$  son funciones que toman valores en el intervalo  $[0, 1]$ , o bien  $[0, 100]$ .

La técnica de LCL ha sido usada por Evanylo y Sumner (1987), Shmidth *et al.* (2000), Shatar y McBratney (2004), Milne *et al.* (2006) y Quesnel *et al.* (2006). En particular, Quesnel *et al.* (2006) la usaron para definir rangos óptimos de concentración de nutrimentos en abeto blanco, considerando al crecimiento como variable dependiente.

La LCL es formada cuando todos los valores para dos variables se grafican; entonces, la línea límite envolvente que incluye a todos esos puntos se establece (Michael *et al.*, 1985). La LCL representa el efecto limitante de la variable independiente con respecto a la variable dependiente (Webb, 1972; Lark, 1997). Así se supone que todos los valores debajo de la LCL resultan de la influencia de otra variable independiente o una combinación de las variables que están limitando a la variable dependiente (Webb, 1972; Hinckley *et al.*, 1978).

Existen varias estrategias para seleccionar y definir la LCL. Enseguida se describe el procedimiento usado en el presente caso para *O. ficus-indica* L. al tomar en cuenta la base de datos original de tamaño  $n=360$ . Para cada uno de los nutrimentos Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca) y Magnesio (Mg) se estimó la LCL. Dado que las observaciones de N, P, Ca y Mg no se distribuyen normalmente, se transformaron a logaritmo natural (ln). Así, las nuevas expresiones de concentración de nutrimentos, excepto K, se usaron como variables independientes vs. rendimiento como variable de respuesta:

1. El primer paso consistió en graficar los datos de la concentración de cada nutrimento ( $\text{g kg}^{-1}$  o  $\ln \text{g kg}^{-1}$ , según el caso) en los cladodios vs. materia fresca de los cladodios ( $\text{kg Planta}^{-1}$ ) como rendimiento. Entonces, cada relación bivariada se usó para analizar el patrón de la distribución, con el fin de determinar su

conveniencia y su potencial utilidad, así como para eliminar valores extraños ('*outliers*'). Las observaciones ubicadas dentro de los extremos inferior y superior (colas de la distribución bivariada) definidos por  $\alpha=0.025$  en cada caso, se consideraron como valores extraños. Por lo tanto, cada nutrimento tuvo su correspondiente distribución bivariada con su respectivo tamaño de muestra (n). Así resultaron: n=328 para N vs. rendimiento; n=332 para P vs. rendimiento; n=327 para K vs. rendimiento; n=318 para el Ca y n=325 para Mg vs. rendimiento. Por ejemplo, la Figura 3a muestra los resultados para la concentración de N vs. rendimiento en *O. ficus-indica* L.

2. El segundo paso consistió en la selección de los puntos situados en el límite superior del diagrama. Ello se realizó al dividir el rango de la concentración del nutrimento (variable independiente) en clases usando el software OpenStat (Miller, 2009) al seleccionar solo al punto máximo para cada intervalo o clase. El razonamiento para considerar a los puntos representativos de las clases se basó en dos criterios:

- i) usar por lo menos seis observaciones representativas para desarrollar el modelo con la finalidad de restringir la selección de puntos al límite superior de la distribución de los puntos, y
- ii) maximizar la probabilidad de desarrollar modelos estadísticamente significativos ( $p \leq 0.05$ ) mediante el incremento del número de observaciones ( $> 6$ ).

Las observaciones seleccionadas, útiles para estimar una LCL en un diagrama, representan una asociación entre la consideración de grupos o clases representativos y el número suficiente de puntos límite (Schmidt, 2000). Estas

condiciones son requisitos previos para una definición confiable de los puntos límite y de la estimación de las líneas límite, respectivamente. Como resultado de ello, se consideraron por lo menos seis puntos, suficientes para tomar en cuenta a la distribución del total de puntos (observaciones) en cada diagrama. Por ejemplo, la Figura 3b muestra a las nueve observaciones representativas que relacionan a la concentración del N con el rendimiento en *O. ficus-indica* L.

3. El tercer paso consistió en ajustar los datos a una función de segundo grado ( $Y = a + bX + cX^2$ ). Ello se puede apreciar en la Figura 3c al considerar a la concentración de N vs. el rendimiento. Cuando la función de segundo grado no es apreciada a simple vista y en lugar de eso aparece una forma triangular, entonces puede usarse un conjunto de dos funciones lineales. Es lógico evidenciar un patrón triangular característico al relacionar los valores máximos de concentración del nutrimento y el rendimiento (Walworth *et al.*, 1986; Evanlyo y Sumner, 1987; Righetti *et al.*, 1990). Es posible estimar la concentración óptima (asociada al rendimiento máximo) de cada nutrimento al calcular el valor correspondiente al vértice máximo ( $-b / 2c$ ) de la curva de la regresión de segundo grado (Figuras 3c, 3d y 3e para la concentración de N). En el caso que aparezca la forma triangular, la concentración óptima puede ser estimada al elegir el punto de cruce entre las dos líneas rectas. Las concentraciones nutrimentales que corresponden al 95% de rendimiento, en el presente caso, se estimaron al considerar que el valor óptimo o máximo de rendimiento calculado con cada regresión de segundo grado corresponde al 100%. Así pues, los rangos óptimos del nutrimento fueron obtenidos como se muestra en la Figura 3e para el N.

### **3.6. Identificación de Interacciones Nutrimentales**

Para la identificación de las interacciones entre los nutrimentos y su relación con el rendimiento del cultivo de nopal se estimó una matriz de coeficientes de correlación de Pearson (García–Hernández *et al.*, 2005). Este coeficiente varía de  $-1$  a  $+1$ , de manera que valores positivos significativos sugieren relaciones sinérgicas (sinergismos), mientras que valores negativos significativos implican relaciones inversas (antagonismos). Para ello se consideró la base de datos original ( $n=360$ ).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Estándares de la Técnica Línea de Curva Límite

En el Cuadro 5 se presentan los estimadores estadísticos de las variables, asociados a la base de datos completa (n=360). El rendimiento es muy variable (Coeficiente de variación, CV=44.3%). Las concentraciones de los nutrientes N, Ca y Mg también presentaron mucha variabilidad (CV's=46.5, 36.5 y 27.6%, respectivamente). En cambio, la variabilidad de las concentraciones de K y P son moderadas con CV's=22.4 y 21%, respectivamente. La variabilidad es un aspecto importante cuando se pretende desarrollar normas o estándares nutrimentales. El rendimiento o la producción de biomasa y las concentraciones de los nutrientes pueden ser consideradas respuestas de las plantas a factores bióticos y abióticos (Melsted *et al.*, 1969; Khiari *et al.*, 2001ab), en especial a aquellos asociados con cambios de las condiciones climáticas y a los diferentes tratamientos de fertilización, por ejemplo. Entonces, esta base de datos puede ser usada para desarrollar normas locales o regionales, debido a la relativa gran variabilidad de las concentraciones de los nutrientes y de la producción de biomasa (García-Hernández *et al.*, 2004; 2005).

En cada diagrama definido por una relación bivariada (concentración del nutriente y rendimiento), la mayoría de los datos se agrupan en la parte baja, i.e. la mayoría de las observaciones corresponden a rendimientos bajos (Figuras 3–7). Los rendimientos altos fueron registrados en raras ocasiones en cada intervalo o clase considerada; entonces, la selección de puntos representativos se facilitó. Así se eligieron los puntos de la parte superior en cada conjunto. Sin embargo, el trazar la línea límite o envolvente a mano es un proceso incierto y no reproducible de manera

fácil. Por lo tanto, el procedimiento descrito en la sección de materiales y métodos fue implementado para evitar esos inconvenientes. Para ello, se involucraron las observaciones representativas de todas las clases definidas en cada caso. Cada uno de los diagramas mostró evidencias de poder identificar puntos a fin de estimar la función de segundo grado que describiera la línea curva límite. La base de datos original (n=360) permitió la aplicación exitosa de la técnica de LCL para identificar los estándares nutrimentales mediante ajustes significativos ( $p < 0.01$ ) a funciones polinomiales de segundo grado para N, P, K, Ca y Mg (Cuadro 6) al usar diferente número de puntos en el límite superior de cada una de las distribuciones. La LCL definida por una función de segundo grado para N, P, K, Ca y Mg fue con 9 de 328, 6 de 332, 14 de 327, 14 de 318, y 11 de 325 puntos, como se aprecia en las Figuras 3–7, respectivamente.

Los modelos para los casos de los cinco nutrimentos presentaron valores grandes de  $R^2$  ( $R^2 > 0.7$ , Cuadro 6). Entonces, la técnica de LCL es particularmente apropiada para N, P, K, Ca y Mg. Además, parece ser que las distribuciones bivariadas con mayor dispersión de las observaciones requieren de un número mayor de puntos para optimizar el producto de la técnica de LCL.



Cuadro 5. Estimadores estadísticos básicos de rendimiento (material fresco de cladodios, kg Planta<sup>-1</sup>) y concentraciones de N, P, K, Ca y Mg (g kg<sup>-1</sup>) en cladodios de *Opuntia ficus-indica* L. de un año de edad para la base de datos completa (n = 360).

Estimador estadístico	Rendimiento	N	P	K	Ca	Mg
Media (kg Planta <sup>-1</sup> o g kg <sup>-1</sup> )	33.1	10.5	3.4	40.5	39.3	15.5
Desviación estándar (kg Planta <sup>-1</sup> o g kg <sup>-1</sup> )	14.6	4.9	0.7	9.1	14.4	4.3
Coefficiente de Variación (%)	44.3	46.5	21.0	22.4	36.5	27.6
Mínimo (kg Planta <sup>-1</sup> o g kg <sup>-1</sup> )	6.00	1.8	1.6	13.8	12.2	7.8
Máximo (kg Planta <sup>-1</sup> o g kg <sup>-1</sup> )	92.0	26.3	6.3	65.5	82.0	39.5

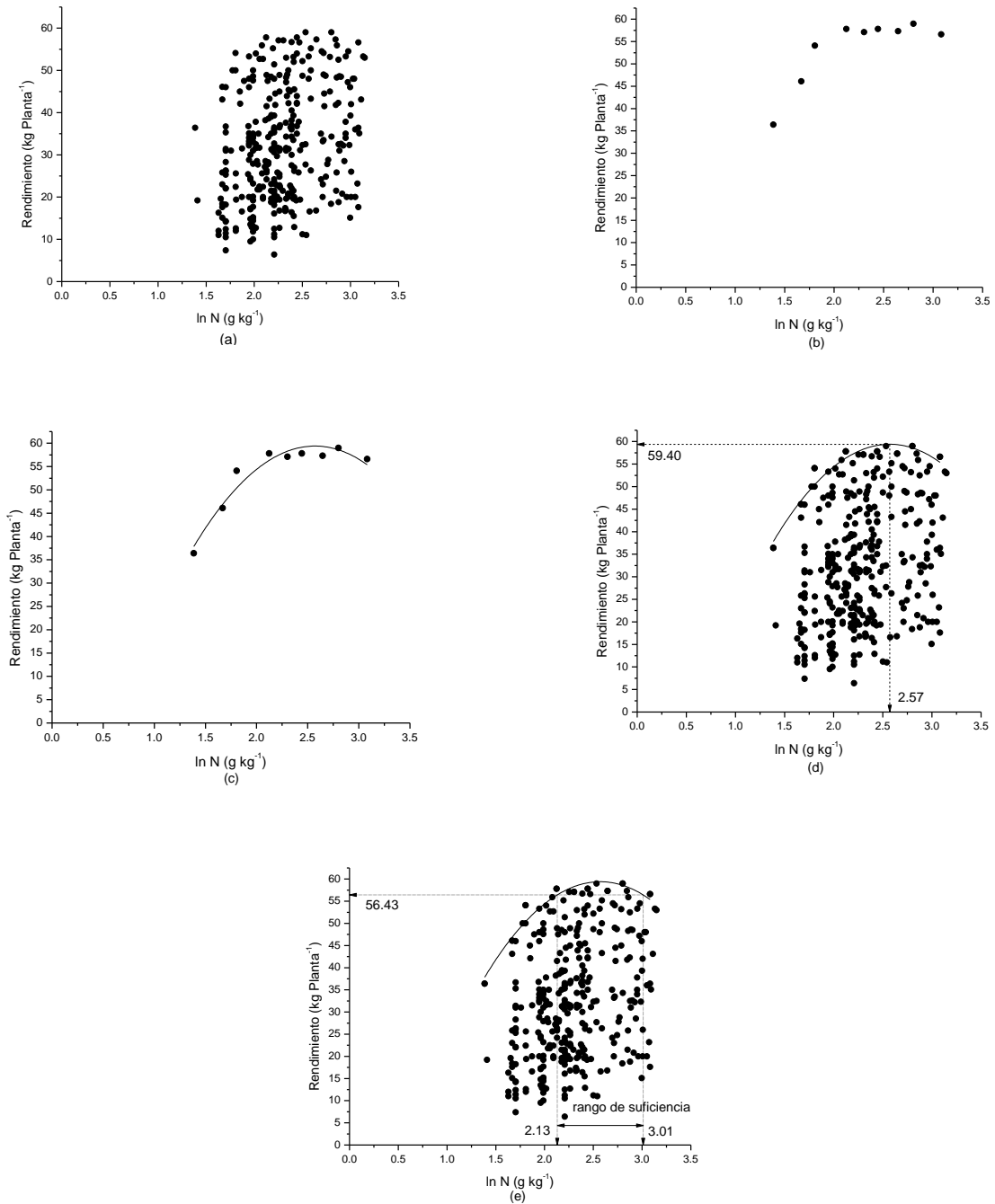


Figura 3. Los diferentes pasos de la técnica de línea de curva límite aplicada a la concentración de N y el rendimiento ( $\text{kg Planta}^{-1}$ ) de *Opuntia ficus-indica* L.

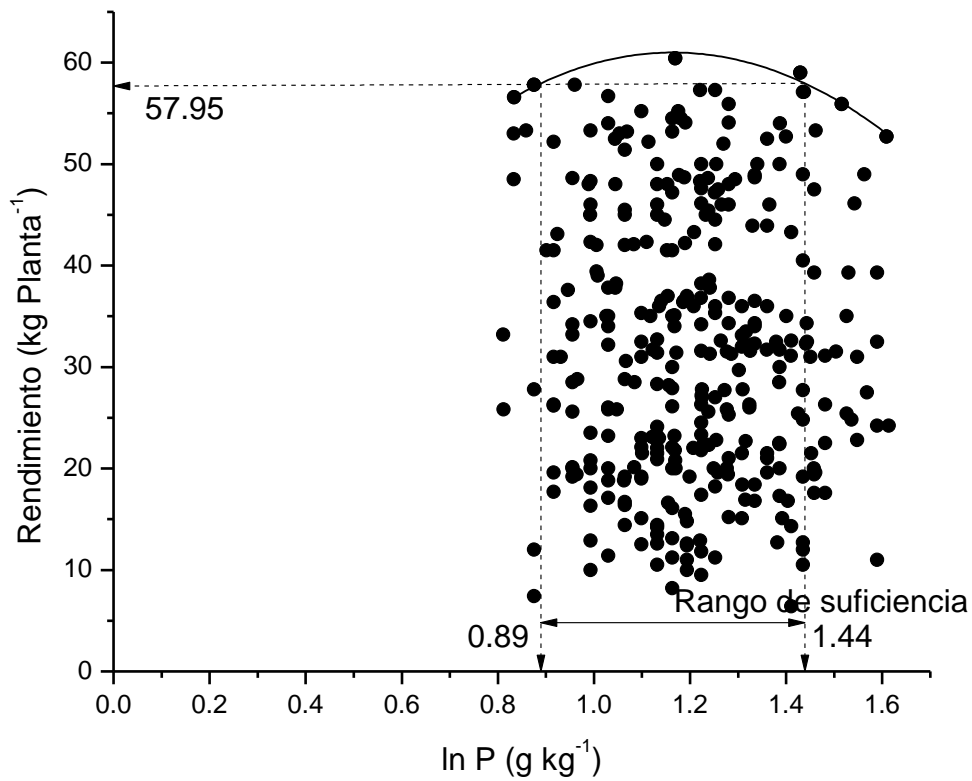


Figura 4. Relación entre la concentración de fósforo (P) y rendimiento (kg Planta<sup>-1</sup>) de *Opuntia ficus-indica* L. en la cual se aprecia la función de segundo grado de la línea de curva límite.

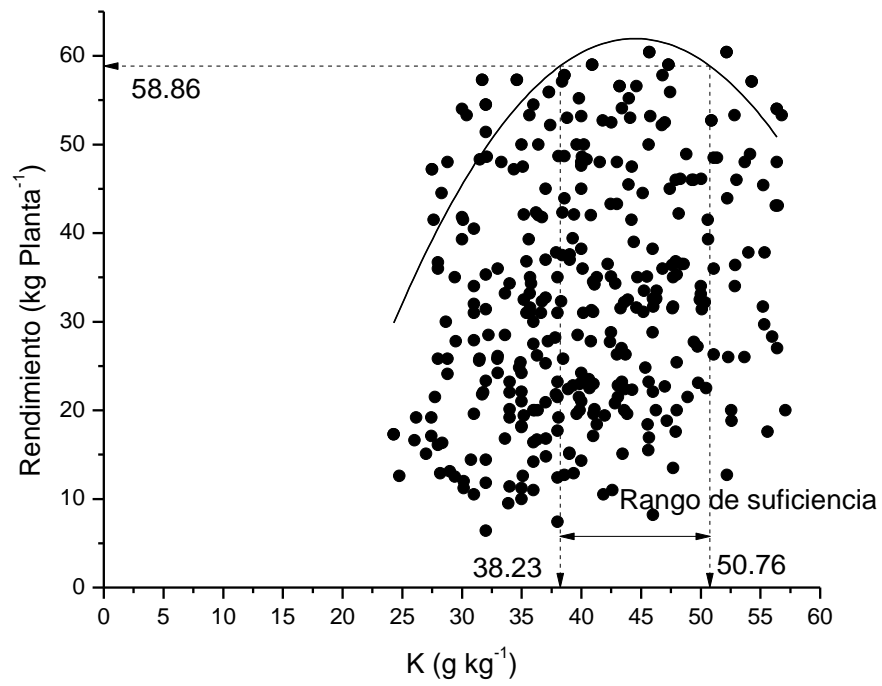


Figura 5. Relación entre la concentración de potasio (K) y rendimiento (kg Planta<sup>-1</sup>) de *Opuntia ficus-indica* L. en la cual se aprecia la función de segundo grado de la línea de curva límite.

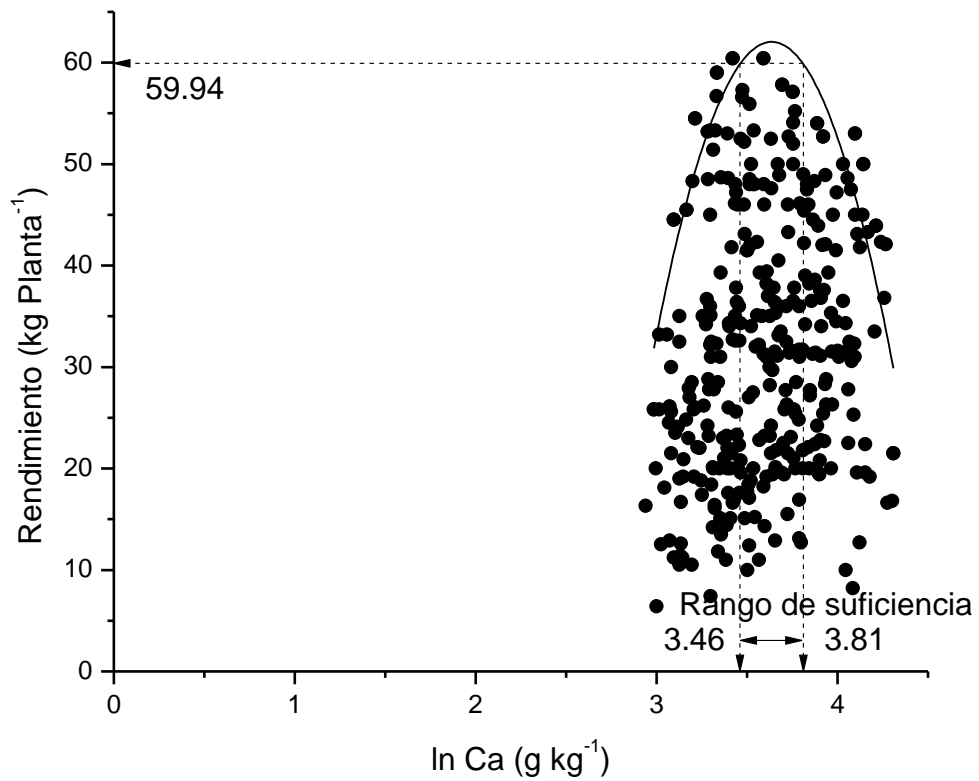


Figura 6. Relación entre la concentración de calcio (Ca) y rendimiento (kg Planta<sup>-1</sup>) de *Opuntia ficus-indica* L. en la cual se aprecia la función de segundo grado de la línea de curva límite.

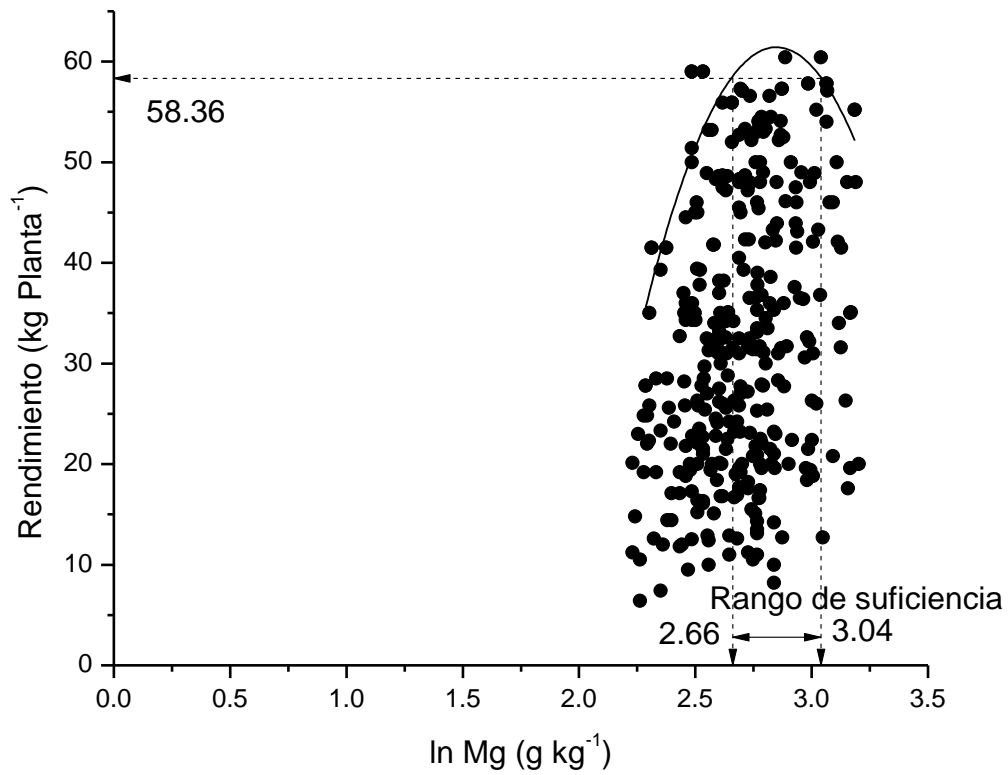


Figura 7. Relación entre la concentración de magnesio (Mg) y rendimiento (kg Planta<sup>-1</sup>) de *Opuntia ficus-indica* L. en la cual se aprecia la función de segundo grado de la línea de curva límite.

Cuadro 6. Parámetros estadísticos de las funciones de segundo grado ( $Y=a+B_1X+B_2X^2$ ). X es rendimiento ( $\text{kg Planta}^{-1}$ ).

Nutrimiento (Y)	n	a	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>	p
N [ $\ln(\text{g kg}^{-1})$ ]	9	-42.09	78.96	-15.36	0.9393	<b>&lt;0.001</b>
p		<b>0.019</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>0.001</b>		
P [ $\ln(\text{g kg}^{-1})$ ]	6	6.3	93.97	-40.36	0.9665	<b>0.006</b>
p		0.413	<b>0.004</b>	<b>0.003</b>		
K [ $\ln(\text{g kg}^{-1})$ ]	14	-93.83	7	-0.08	0.7288	<b>&lt;0.001</b>
p		0.071	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>		
Ca [ $\ln(\text{g kg}^{-1})$ ]	14	-879.96	518.14	-71.25	0.8313	<b>&lt;0.001</b>
p		<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>	<b>&lt;0.001</b>		
Mg [ $\ln(\text{g kg}^{-1})$ ]	11	-601.8	465.69	-81.75	0.7898	<b>0.002</b>
p		<b>0.006</b>	<b>0.004</b>	<b>0.006</b>		

Coefficientes y modelos significativos a  $p < 0.05$  en negritas.

Cuadro 7. Concentraciones óptimas y rangos de suficiencia estimados con la técnica de curva límite para *Opuntia ficus-indica* L.

Nutrimento	Nutrimento (100% rendimiento)	100% rendimiento (kg Planta <sup>-1</sup> )	Rango de suficiencia (95% rendimiento)		95% rendimiento (kg Planta <sup>-1</sup> )
			Inferior	Superior	
N [ln (g kg <sup>-1</sup> )]	2.57 (13.07) <sup>¶</sup>	59.40	2.13 (8.41) <sup>¶</sup>	3.01 (20.28) <sup>¶</sup>	56.43
P [ln (g kg <sup>-1</sup> )]	1.16 (3.19)	60.99	0.89 (2.44)	1.44 (4.22)	57.95
K (g kg <sup>-1</sup> )	44.39	61.96	38.23	50.76	58.86
Ca [ln (g kg <sup>-1</sup> )]	3.64 (38.09)	62.05	3.46 (31.82)	3.81 (45.15)	59.94
Mg [ln (g kg <sup>-1</sup> )]	2.85 (17.29)	61.43	2.66 (14.30)	3.04 (20.91)	58.36

<sup>¶</sup>Valores retransformados en paréntesis.



Los valores de concentración óptima asociados a la técnica de LCL son los siguientes: N = 13.07 g kg<sup>-1</sup>, P = 3.19 g kg<sup>-1</sup>, K = 44.39 g kg<sup>-1</sup>, Ca = 38.09 g kg<sup>-1</sup>, y Mg = 17.29 g kg<sup>-1</sup> (Cuadro 7, Figuras 3–7). Mientras que los rangos de suficiencia a 95% de rendimiento son 8.41–20.28 g kg<sup>-1</sup> para N, 2.44–4.22 g kg<sup>-1</sup> para P, 38.23–50.76 para g kg<sup>-1</sup> para K, 31.82–45.15 g kg<sup>-1</sup> para Ca, y 14.3–20.91 g kg<sup>-1</sup> para Mg (Cuadro 7, Figuras 3–7).

De acuerdo a las concentraciones óptimas de los nutrimentos en cladodios de un año de edad en la especie *O. ficus-indica* L. (Cuadro 7), el orden de requerimiento es: K > Ca > Mg > N > P. Esos resultados indican claramente que las proporciones K/N y Ca/N son 3.4 y 2.9, respectivamente; lo cual sugiere que las plantas tienden a concentrar mucho más K y Ca que N en sus cladodios de un año de edad, lo cual comprueba que son organismos calcitróficos (Lüttge, 2004). El K es el nutrimento con mayor concentración en los frutos (tunas) de *O. ficus-indica* L. cuando el propósito es producción de fruta (Galizzi *et al.*, 2004); entonces, ello explica su alta concentración en los cladodios de un año de edad.

También se han señalado los siguientes valores de la proporción Ca/N: 4.5 (Magallanes–Quintanar, 2004), 3.95 (Galizzi *et al.*, 2004) y 3.84 (Blanco–Macías *et al.*, 2006). Todos esos valores son mayores que los asociados a los estándares de la técnica de LCL (Ca/N = 2.9). Ciertamente, este es un aspecto interesante e importante en plantas cultivadas de *O. ficus-indica* L. porque tienden a acumular más Ca en sus cladodios que la mayoría de las especies cultivadas (Magallanes–Quintanar, 2004) en sus tejidos de referencia (*e.g.* hojas).

Con respecto al Mg y al P, el primero está concentrado más de cinco veces (5.6) que el segundo (Cuadro 7). Previamente, Magallanes–Quintanar *et al.* (2004) y Blanco–Macías *et al.* (2006) consignaron una proporción Mg/P = 4.7.

Nerd y Mizrahi (1992) reportaron que las concentraciones de N de 7.5 a 9.6 g kg<sup>-1</sup> inducen altos rendimientos de fruta en *O. ficus-indica* L. Sin embargo, el estándar de N (13.07 g kg<sup>-1</sup>, Cuadro 7) de la técnica de LCL es mayor que el valor mayor del rango reportado por Nerd y Mizrahi (1992). Eso puede deberse a que el propósito de producción es diferente. Aún así, los resultados de LCL confirman claramente que el incremento de la concentración de N en los cladodios induce el rendimiento, y corroboran lo señalado por Nerd y Nobel (1995) en términos de brotación.

La información del Cuadro 7 permite estimar los requerimientos nutrimentales del nopal en términos de la cantidad mínima de cada nutriente que debe estar disponible en el suelo y que pueda ser absorbida y acumulada por el cultivo. En otras palabras, si se desean producir los rendimientos asociados al 95% del máximo (56–60 kg planta<sup>-1</sup>) y al considerar que la materia seca asociada es el 5% del total de biomasa (materia fresca), es imprescindible que cada planta de nopal disponga y absorba 23.7, 7.06, 112.5, 95.36 y 41.7 g de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente.

Una ventaja de conocer esas cifras se refiere a que es factible estimar necesidades de los nutrientes en función de la densidad de plantación. Por ejemplo, al considerar que se tiene una huerta con 10,000 plantas ha<sup>-1</sup>, conviene que en el suelo haya la disponibilidad de 237, 71, 1124, 954 y 417 kg ha<sup>-1</sup> de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente, con la finalidad de obtener al menos 564 t ha<sup>-1</sup> de materia fresca o 28 t ha<sup>-1</sup> de materia seca de nopal, al considerar el requerimiento mínimo asociado al 95% del rendimiento (Cuadro 8).

Cuadro 8. Requerimiento de nutrimentos del nopal (*Opuntia ficus-indica* L.) y rendimientos estimados al considerar una densidad de 10,000 plantas por hectárea. Se considera que la materia seca es el 5% de la materia fresca.

Nutrimento	Nutrimento (100% rendimiento)	100% rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )  Materia Fresca (Materia Seca)	Rango de suficiencia (95% rendimiento)		95% rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )  Materia Fresca (Materia Seca)
			Inferior	Superior	
N (kg ha <sup>-1</sup> )	388.18	594.0 (29.70)	237.33	572.30	564.30 (28.22)
P (kg ha <sup>-1</sup> )	97.30	609.9 (30.50)	70.76	122.38	579.50 (29.00)
K (kg ha <sup>-1</sup> )	1,375.20	619.6 (30.98)	1,123.96	1,492.34	588.06 (29.40)
Ca (kg ha <sup>-1</sup> )	1,181.93	620.5 (31.03)	953.65	1,353.15	599.40 (29.97)
Mg (kg ha <sup>-1</sup> )	531.15	614.3 (30.72)	417.27	610.15	583.60 (29.18)

#### 4.2. Comparación Entre Estándares de la Técnica Línea de Curva Límite y las Normas de Diagnóstico de Nutrimiento Compuesto

Los estándares óptimos de la técnica de la LCL para N, K y Mg son ligeramente mayores que aquellos obtenidos con el método de DNC ( $13.07 > 12.9$ ,  $44.39 > 42.4$ , y  $17.29 > 16.1$  g kg<sup>-1</sup>, respectivamente) por Blanco–Macías *et al.* (2006). Por otra parte, las concentraciones óptimas de P y Ca de la LCL son ligeramente menores que las obtenidas con DNC ( $3.2 < 3.6$  y  $38.1 < 49.6$  g kg<sup>-1</sup>, respectivamente) por Blanco–Macías *et al.* (2006).

Es interesante señalar que los rendimientos máximos (100%) asociados a los estándares de la LCL (Figuras 3–7) son mayores (>24%) que el rendimiento de referencia (46.7 kg Planta<sup>-1</sup>) usado para dividir a la base de datos con el fin de desarrollar las normas de DNC reportadas por Blanco–Macías *et al.* (2006) para *O. ficus-indica* L. Esto sugiere que las concentraciones óptimas de la LCL (Cuadro 7), asociadas a máximos rendimientos, son confiables, pues aseguran rendimientos mayores al rendimiento de referencia de 46.7 kg Planta<sup>-1</sup> de la técnica de DNC (Cuadro 1).

Respecto a los rangos de suficiencia para el caso de N, el rango de la LCL (8.41–20.28 g kg<sup>-1</sup>) es ligeramente más amplio que el rango de DNC (8.2–17.6 g kg<sup>-1</sup>) y gran parte del último se circunscribe al rango de la LCL. El rango de suficiencia de la LCL para P (2.44–4.22 g kg<sup>-1</sup>) es también ligeramente más amplio que el correspondiente a DNC (2.8–4.4 g kg<sup>-1</sup>). El rango de suficiencia de Mg (14.30–20.91 g kg<sup>-1</sup>) también es más amplio que el rango de DNC (13.14–18.8 g kg<sup>-1</sup>).

En el caso de K, el rango de suficiencia de la LCL (38.23–50.76 g kg<sup>-1</sup>) es más corto que el correspondiente a DNC (33.6–51.2 g kg<sup>-1</sup>). De manera similar, el rango de

suficiencia de la LCL para Ca ( $31.82\text{--}45.15\text{ g kg}^{-1}$ ) es menor que el de DNC ( $32.3\text{--}66.9\text{ g kg}^{-1}$ ); pero el último cubre totalmente al rango de la LCL. Estos resultados sugieren que las normas de la LCL pueden ser más sensibles que los correspondientes a la técnica de DNC para diagnosticar el estado nutrimental con respecto a K y Ca, lo cual es en grado sumo importante porque *O. ficus-indica* L. es calcitrófica (Lüttge, 2004; Blanco-Macías *et al.*, 2006).

En general, todos esos resultados sugieren que las concentraciones inferiores y superiores que definen a los rangos nutrimentales de la LCL a 95% de rendimiento son confiables. Al contrastar los estándares de la LCL con las normas de DNC estimadas por Blanco-Macías *et al.* (2006) para *O. ficus-indica* L. se concluye que son casi similares. El uso de esta estrategia coincide con los resultados de Vizcaíno-Soto y Côté (2004) quienes reportaron que los estándares nutrimentales de la LCL para maple sacarino (*Acer saccharum* Marsh.) son comparables con los previamente computados con la técnica de DNC.

Es imprescindible resaltar que la transformación de las variables cuyas observaciones no se distribuyeron normalmente fue un proceso necesario. Con ello se garantizan resultados confiables. Por ejemplo, las concentraciones máximas (óptimas) de los cinco nutrimentos se asocian a rendimientos mayores que el rendimiento de referencia de las normas de DNC; por lo tanto, se espera que sean más sensibles para detectar desórdenes nutrimentales mediante el diagnóstico. Por otro lado, los límites inferiores y superiores de los rangos de suficiencia de la LCL son casi similares a los asociados a las normas de DNC. Así entonces, los resultados confirman que ambas técnicas son más complementarias que mutuamente excluyentes.

### 4.3. Interacciones Nutrimientales

La matriz de correlaciones (Cuadro 9) provee un panorama general de la dependencia del rendimiento de algunos nutrimentos, así como de las interacciones nutrimentales significativas ( $p < 0.05$ ). El rendimiento es dependiente de manera significativa ( $p \leq 0.05$ ) de las concentraciones de los nutrimentos N, Mg, Ca y K en cladodios de un año de edad. Las correlaciones positivas significativas entre cada uno de los nutrimentos N, Mg, Ca y Ca con el rendimiento implican que el rendimiento se incrementa conforme aumentan sus concentraciones en los cladodios de un año de edad. Además, las interacciones nutrimentales significativas entre K y Mg, Ca y Mg, N y K, y Ca y P fueron identificadas como sinergismos, es decir, ambos aumentan sus concentraciones dentro de los rangos contemplados; mientras que la interacción entre N y Ca se identificó como antagonismo, lo cual significa que conforme la concentración de uno aumenta, la del otro disminuye. Y aunque el P no se correlacionó de manera significativa con el rendimiento, es importante mantener niveles adecuados de todos los nutrimentos en los cladodios para asegurar que la fotosíntesis o los procesos regulatorios funcionen óptimamente. Para confirmar este supuesto, una matriz de correlaciones de Pearson entre el rendimiento y cada una de las posibles interacciones, incluyendo a las que resultaron ser significativas, fue desarrollada.

Los resultados del Cuadro 10 permiten apreciar que las interacciones entre K y P, Ca y P, y Mg y P tienen un efecto positivo sobre el rendimiento, lo cual confirma el supuesto previamente señalado. Además, es notorio que las interacciones entre P y N, Mg y N, Ca y N afectan negativamente la producción de biomasa. Estos resultados resaltan la complejidad de la planta de nopal con respecto a su nutrición;

sin embargo, es interesante señalar que curiosamente la interacción entre el P y el N es en grado sumo importante en el presente caso, pues dichos nutrimentos participan en las otras cinco interacciones que afectan de manera significativa al rendimiento. Ello sugiere que, entonces, la interacción más importante de las evidenciadas en el presente estudio es la proporción P/N; así como que el desorden nutrimental se debe, también, posiblemente a una insuficiencia de N, de manera general. Esta aseveración, es confirmada por los mayores coeficientes de correlación significativos en cada uno de los Cuadros 9 y 10 (0.292 para rendimiento vs. N y -0.278 para rendimiento vs. lnP/N, respectivamente).

De las cinco interacciones nutrimentales significativas ( $p \leq 0.05$ ) evidenciadas (Cuadro 9), solamente dos (Ca/N y Ca/P, Cuadro 10) afectan de manera significativa ( $p \leq 0.05$ ) al rendimiento. Llama la atención que la proporción Ca/N lo afecte negativamente y que la otra (Ca/P) lo haga positivamente. Ello seguramente está asociado a un exceso de Ca o bien a una insuficiencia de N; pero también a una posible deficiencia de P con respecto al Ca. El antagonismo entre N y Ca fue reportado por Blanco-Macías *et al.* (2006), pero no se puede atribuir a un efecto de dilución del Ca con respecto al N porque las posibilidades de su dilución son mínimas ya que las plantas de *O. ficus-indica L.* tienden a acumular más Ca en sus tejidos conforme aumenta su edad (Magallanes-Quintanar *et al.*, 2004; Lüttge, 2004). En general, la interacción entre Ca y P es negativa, pero en el presente caso resultó ser positiva (Cuadro 9) e influye positivamente sobre el rendimiento (Cuadro 10), lo cual puede asociarse a que es *O. ficus-indica L.* calcitrófica (Lüttge, 2004) y demanda aún más Ca y P porque están disponibles en el suelo del sitio experimental (Cuadro 2).

Cuadro 9. Matriz de correlaciones de Pearson (r) entre los nutrientes y el rendimiento en *Opuntia ficus-indica* L. No se consideraron observaciones con algún valor extraño, de manera que n=250.

Expresión nutrimental	K (g kg <sup>-1</sup> )	ln Ca [ln (g kg <sup>-1</sup> )]	ln Mg [ln (g kg <sup>-1</sup> )]	ln P [ln (g kg <sup>-1</sup> )]	ln N [ln (g kg <sup>-1</sup> )]
ln Ca [ln (g kg <sup>-1</sup> )]	0.092 p=0.147				
ln Mg [ln (g kg <sup>-1</sup> )]	<b>0.416</b> <b>p=0.0001</b>	<b>0.304</b> <b>p=0.0001</b>			
ln P [ln (g kg <sup>-1</sup> )]	0.078 p=0.219	<b>0.139</b> <b>p=0.028</b>	0.060 p=0.344		
ln N [ln (g kg <sup>-1</sup> )]	<b>0.160</b> <b>p=0.011</b>	<b>-0.237</b> <b>p=0.0001</b>	-0.075 p=0.239	0.037 p=0.565	
Rendimiento (kg Planta <sup>-1</sup> )	<b>0.201</b> <b>p=0.001</b>	<b>0.253</b> <b>p=0.0001</b>	<b>0.272</b> <b>p=0.0001</b>	-0.088 p=0.165	<b>0.292</b> <b>p=0.0001</b>

Coeficientes de correlación de Pearson (r) significativos a p<0.05 en negritas.



Cuadro 10. Matriz de correlaciones de Pearson (r) entre las interacciones nutrimentales y el rendimiento en *Opuntia ficus-indica* L. No se consideraron observaciones con algún valor extraño, de manera que n=250.

Interacción nutrimental	Rendimiento (kg Planta <sup>-1</sup> )
K/InCa	0.084 p=0.187
K/In Mg	0.094 p=0.139
K/InP	<b>0.236</b> <b>p=0.0001</b>
K/InN	-0.052 p=0.417
InCa/InMg	0.014 p=0.820
InCa/InP	<b>0.236</b> <b>p=0.0001</b>
InCa/InN	<b>-0.132</b> <b>p=0.038</b>
InMg/InP	<b>0.232</b> <b>p=0.0001</b>
InMg/InN	<b>-0.152</b> <b>p=0.016</b>
InP/InN	<b>-0.278</b> <b>p=0.0001</b>

Coeficientes de correlación de Pearson (r) significativos a  $p < 0.05$  en negritas.

## 5. CONCLUSIONES

La línea límite se ajustó a una función de segundo grado para los casos de N, P, K, Ca y Mg. Los estándares de la técnica de línea límite para *Opuntia ficus-indica* L. son: N=13.07 g kg<sup>-1</sup>, P=3.19 g kg<sup>-1</sup>, K=44.39 g kg<sup>-1</sup>, Ca=38.09 g kg<sup>-1</sup> y Mg=17.29 g kg<sup>-1</sup>; mientras que los rangos de suficiencia a 95% de rendimiento son 8.41–20.28 g kg<sup>-1</sup> para N, 2.44–4.22 g kg<sup>-1</sup> para P, 38.23–50.76 g kg<sup>-1</sup> para K, 31.82–45.15 g kg<sup>-1</sup> para Ca y 14.3–20.91 g kg<sup>-1</sup> para Mg. De esta manera se confirma la primera hipótesis formulada.

Para producir los rendimientos asociados al 95% del máximo (56–60 kg planta<sup>-1</sup>) y al considerar que la materia seca asociada es el 5% del total de biomasa (materia fresca), es imprescindible que cada planta de nopal disponga y absorba 23.7, 7.06, 112.5, 95.36 y 41.7 g de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente.

Los estándares de la técnica de LCL para *Opuntia ficus-indica* L. son confiables. Los valores inferior y superior de los rangos de suficiencia a 95% de rendimiento son tan confiables como las normas nutrimentales desarrolladas con la técnica de DNC. Sin embargo, los lectores deben tomar en cuenta que esos resultados son probablemente válidos solo a niveles local y regional; es decir, es aconsejable considerar que las plantas de *Opuntia ficus-indica* L. estuvieron creciendo en condiciones de un suelo Castañozem Lúvico y calcáreo, y de un clima BS1bw(w). Con esta conclusión se confirma la segunda hipótesis planteada.

El rendimiento es dependiente ( $p \leq 0.05$ ) de las concentraciones de los nutrientes N, Mg, Ca y K en cladodios de un año de edad. Las interacciones entre K y P, Ca y P, y Mg y P tienen un efecto positivo sobre el rendimiento. Las interacciones entre P y N,

Mg y N, Ca y N afectan negativamente la producción de biomasa. Con ello se confirma la tercera hipótesis formulada.

## 6. REFERENCIAS

- Aitchison, J. 1986. *Statistical Analysis of Compositional Data*. Chapman and Hall, New York.
- Baca, C. G. A. 1988. Deficiencias nutrimentales inducidas en nopal proveniente de cultivo *in vitro*. In: Memoria de la III Reunión Nacional y I Reunión Internacional. El Nopal. 10–14 de octubre. Saltillo, Coahuila, México. p. 163.
- Barrientos, P.F. 1990. Establecimiento de viveros de nopal. *In*: Memorias IV Reunión Nacional y II Congreso Internacional Sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal. SOMECH, A. C., INCA–Rural–CECCAM. Zacatecas, Zac., México. p. 21.
- Bates, T.E. 1971. Factor affecting critical nutrient concentrations in plant and their evaluation: A review. *Soil Sci.* 112: 116–130.
- Borrego, E. F. y N. Burgos V. 1986. *El Nopal*. Ed. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Saltillo, Coahuila, México. 145 p.
- Blanco–Macías, F. 1999. Producción de nopal para verdura en microtunel en Zacatecas. Tesis Profesional. Unidad Académica de Agronomía–Universidad Autónoma de Zacatecas. Zacatecas, Zac. México. 61 p.
- Blanco–Macías, F. 2005. Diagnóstico de nutriente compuesto de nopal (*Opuntia ficus–indica* L. Miller) en Zacatecas. Tesis de Maestría. Unidad Académica de Agronomía–Universidad Autónoma de Zacatecas. Zacatecas, Zac. México. 66 p.
- 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.
- Cakmak, I. 2000. Role of zinc in protecting plant cells from reactive oxygen species. New Phytol. 146: 185–205.
- Comisión de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1972. Carta Edafológica. CETENAL, México.
- Dow, A.I, and S. Roberts. 1982. Proposal: Critical nutrient ranges for crop diagnosis. Agron. J. 74: 401–403.
- Evanylo, G.K. 1990. Soil and plant calibration for cucumbers grown in the mid–Atlantic coastal plain. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 21: 251–272.
- Evanylo, G.K., and M.E. Sumner. 1987. Utilization of the boundary line approach in the development of soil nutrient norms for soybean production. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 18(12): 1379–1401.
- Felker, P., del C. Rodríguez S., R. M. Casoliba, R. Filippini, D. Medina and R. Zapata. 2005. Comparison of *Opuntia ficus indica* varieties of Mexican and Argentine origin for fruit yield and quality in Argentina. J. Arid Environm. 60: 405–422.
- Fernández, M. W. R., J. Vázquez, R. y J. A. Villalobos, L. 1992. Fertilización preliminar de nopal para verdura en milpa Alta, D, F. *In*: Memorias del V Congreso Nacional y III Congreso Internacional sobre conocimiento y aprovechamiento de el Nopal. 11–15 de agosto. Chapingo, Estado de México. pp. 57–58.
- Fraser, J., and G.W. Eaton. 1983. Applications of yield component analysis to crop research. Field Crops Abstracts 36: 787–797.

- 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.
- García-Hernández, J.L., R.D. Valdez-Cepeda, N.Y. Ávila-Serrano, B. Murillo-Amador, A. Nieto-Garibay, R. Magallanes-Quintanar, J. Larrinaga-Mayoral, and E. Troyo-Diéquez. 2005. Preliminary compositional nutrient diagnosis norms for cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) grown on desert calcareous soil. *Plant and Soil* 271 (1–2): 297–307.
- García-Hernández, J.L., R.D. Valdez-Cepeda, B. Murillo-Amador, A. Nieto-Garibay, L.F. Beltrán-Morales, R. Magallanes-Quintanar, and E. Troyo-Diéquez. 2004. Compositional nutrient diagnosis and main nutrient interactions in yellow pepper grown on desert calcareous soils. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 167: 509–515.
- Gathaara, G.N., P. Felker, and M. Land. 1989. Influence of nitrogen and phosphorus application on *Opuntia engelmannii* tissue N concentrations, biomass production and fruit yield. *J. Arid Environm.* 16: 337–347.
- González, C.L., and J.H. Everitt. 1990. Fertilizer effects on the quality and the production of prickly pear cactus and its wildlife value. In: *Proceedings of the First Annual Texas Prickly Pear Council*. Kingsville, TX, USA. pp. 3–13.
- Gutiérrez-Acosta, F., R.D. Valdez-Cepeda, and F. Blanco-Macías. 2002. Multivariate analysis of cactus pear (*Opuntia* spp.) fruits from a germplasm collection. *Acta Horticulturae* 581: 111–118.
- Herrera, A. G. y G. Alejandro. 1992. El cultivo del nopal en el Estado de Durango. *In: Memorias del V Congreso Nacional y III Congreso Internacional sobre*

- conocimiento y aprovechamiento de el Nopal. 11–15 de agosto. Chapingo, Estado de México. p. 26.
- Hinckley, T.M., R.G. Aslin, R.R. Aubuchon, C.L. Metcalf, and J.E. Roberts. 1978. Leaf conductance and photosynthesis in four species of the oak–hickory forest type. *Forest Science* 24: 73–84.
- Khiari, L., L.E. Parent, and N. Tremblay. 2001a. Selecting the high–yield subpopulation for diagnosing nutrient imbalance in crops. *Agron. J.* 93: 802–808.
- Khiari, L., L.E. Parent, and N. Tremblay. 2001b. The phosphorus composition nutrient diagnosis range for potato. *Agron. J.* 93(4): 815–819.
- Lark, R.M. 1997. An empirical method for describing the joint effects of environmental and other variables on crop yield. *Ann. Appl. Biol.* 131: 141–159.
- Loneragan, J.F. 1997. Plant nutrition in the 20th and perspectives for the 21st century. *Plant and Soil* 196: 163–174.
- Lüttge, U. 2004. Ecophysiology of crassulacean acid metabolism (CAM). *Ann. Bot.* 93: 629–652.
- Magallanes–Quintanar, R., R.D. Valdez–Cepeda, F. Blanco–Macías, M. Márquez–Madrid, R.R. Ruíz–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, E. Olivares–Sáenz, O. Pérez–Veyna, and J.L. García–Hernández. 2006a. Compositional nutrient diagnosis in maize grown in a calcareous soil. *J. Plant Nutr.* 29: 2019–2033.

- 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. 2006b. Nutrient interactions in nopal (*Opuntia ficus–indica*) and their effect on biomass production. *Acta Horticulturae* 728: 145–150.
- Melsted, S.W, H.L. Motto, and T.R. Peck. 1969. Critical plant nutrient composition values useful in interpreting plant analysis data. *Agron. J.* 61:17–20.
- Michael, D.A., D.I. Dickman, K.W. Gottschalk, N.D. Nelson, and J.G. Isebrands. 1985. Determining photosynthesis of tree leaves in the field using a portable  $^{14}\text{CO}_2$  apparatus: procedures and problems. *Photosynthetica* 19: 98–108.
- Milne, A.E., H.C. Wheeler, and R.M. Lark. 2006. On testing biological data for the presence of a boundary. *Ann. Appl. Biol.* 149 (2): 213–222.
- Miller, W.G. 2009. *Statistics and Measurement Using OpenStat.* 545 p. <http://statpages.org/miller/openstat/ATextBook.pdf>
- Møller–Nielsen J., and B. Frijs–Nielsen. 1976. Evaluation and control of the nutritional status of cereals, II: Pure effect of a nutrient. *Plant and Soil* 45: 339–351.
- Mondragón, J.C. y E. Pimienta. 1990. Fertilización orgánica y química del nopal tunero en zonas semiáridas. In: *Memorias: IV Reunión Nacional y II Congreso Internacional Sobre el Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal.* SOMECH, A.C., INCA-Rural-CECCAM. Zacatecas, Zac., México. p. 28.
- Murillo, A. B., Troyo D. y A. Villaseñor B. 1999. Efectos del estiércol de bovinos en cultivos de nopal tunero (*Opuntia* spp) introducido a Baja California Sur, México. *In: Memoria del VIII Congreso Nacional y VI Congreso Internacional sobre conocimiento y aprovechamiento de el Nopal.* 6–10 de septiembre. San Luis Potosí, SLP. México. pp. 87–88.



- Nerd, A., and Y. Mizrahi. 1992. Effects of fertilization on prickly pear production in Israel. Proceedings of the Third Annual Texas Prickly Pear Council. Kingsville, TX, USA. pp. 1–4.
- Nerd, A., and P. Nobel. 1995. Accumulation, partitioning and assimilation of nitrate in *Opuntia ficus–indica*. J. Plant Nutr. 18(12): 2533–2549.
- Nobel, P.S., Ch.E. Russell, P. Felker, J. Galo, and E. Acuña. 1987. Nutrient relations and productivity of prickly pear cacti. Agronomy Journal 79(3): 550–555.
- Parent, L.E., A.N. Cambouris, and A. Muhawenimana. 1994. Multivariate diagnosis of nutrient imbalance in potato crops. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 1432–1438.
- Parent, L.E., and M. Dafir. 1992. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. J. Am. Soc. Hort. Sci. 117: 239–242.
- Parent, L.E., A. Karam, and S.A. Visser. 1993. Compositional nutrient diagnosis of the greenhouse tomato. Hortsci. 28: 1041–1042.
- Parent, L.E., and M. Dafir. 1992. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. J. Am. Soc. Hort. Sci. 117: 239–242.
- Pimienta–Barrios, E. 1990. El Nopal Tunero. Universidad de Guadalajara, México. 235 p.
- Quesnel, P.–O., B. Côté, J.W. Fyles, and A.D. Munson. 2006. Optimum nutrient concentrations and CND scores mature white spruce determined using a boundary–line approach and spatial variation of tree growth and nutrition. J. Plant Nutr. 29(11): 1999–2018.
- Righetti, T.L., K.L. Wilder, and G.A. Gummings. 1990. Plant Analysis as an Aid to Fertilizing Orchard Crops. pp. 563–601. In: R.L. Westerman (ed.). Soil Testing and Plant Analysis. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.

- SAGARPA–SIAP. 2010. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Ciclo: cíclicos y perennes 2010. Modalidad riego y temporal. México. <http://www.siap.gob.mx/>. Consultado el 15 de febrero de 2010.
- Schmidt, U., H. Ton, and M. Kaupenjohann. 2000. Using a boundary line approach to analyze N<sub>2</sub>O flux data from agricultural soils. *Nutr. Cyc. Agroecosystems* 57(2): 119–129.
- Shatar, T.M., and A.B. McBratney. 2006. Boundary–line analysis of field scale yield response to soil properties. *J. Agric. Sci.* 142: 553–560.
- Vizcaíno–Soto, G., and B. Côté. 2004. Boundary–line approach to determine standards of nutrition for mature trees from spatial variation of growth and foliar nutrient concentrations in natural environments. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 35: 2965–2985.
- Walworth, J.L., W.S. Letzsch, and M.E. Sumner. 1986. Use of boundary lines in establishing diagnostic norms. *Soil Sci. Am. J.* 50: 123–128.
- Walworth, J.L., and M.E. Sumner. 1987. The diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). *Adv. Soil Sci.* 6: 149–188.
- Webb, R.A. 1972. Use of the boundary–line in the analysis of biological data. *J. Hort. Sci.* 47: 309–319.

## **ANEXOS**

# COMPARISON BETWEEN CND NORMS AND BOUNDARY-LINE APPROACH NUTRIENT STANDARDS: *Opuntia ficus-indica* L. CASE

F. Blanco-Macías<sup>1</sup>; R. Magallanes-Quintanar<sup>2</sup>;  
R. D. Valdez-Cepeda<sup>1,3\*</sup>; R. Vázquez-Alvarado<sup>4</sup>;  
E. Olivares-Sáenz<sup>4</sup>; E. Gutiérrez-Ornelas<sup>4</sup>;  
J. A. Vidales-Contreras<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Centro Regional Universitario Centro-Norte, Universidad Autónoma Chapingo,  
Cruz del Sur Núm. 100, Col. Constelación. Apartado Postal 196,  
El Orito, Zacatecas, Zacatecas, C. P. 98085, MÉXICO.

Estudiante de doctorado en la Universidad Autónoma de Nuevo León,  
Facultad de Agronomía, Km 17.5 Carretera Zuazua-Marín, C. P. 66700,  
Marín, Nuevo León, Correo-e: fiblama63@gmail.com

<sup>2</sup>Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica. Cuerpo Académico de Sistemas Complejos,  
Universidad Autónoma de Zacatecas, Avenida R. López Velarde 801, Zacatecas, Zacatecas,  
C. P. 98064, MÉXICO. Correo-e: tiquis@gmail.com

<sup>3</sup>Unidad Académica de Matemáticas, Cuerpo Académico de Sistemas Complejos,  
Universidad Autónoma de Zacatecas, Paseo Solidaridad s/n, Zacatecas, Zacatecas., C. P. 98064. MÉXICO.  
Correo-e: vacrida@hotmail.com (\*Autor responsable)

<sup>4</sup>Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León,  
Km. 17.5, Carretera Zuazua-Marín.  
Marín, Nuevo León, C. P. 66700, MÉXICO.

## ABSTRACT

It is a need to know optimum concentrations and/or optimum ranges of nutrients useful for correct diagnosis and improvements of nutrient status of cultivated plants. Recognizing the need to develop correct nutritional standards, it is convenient to improve or to ensure the reliability of those already determined. Having in mind that aim, boundary-line approach standards were developed taking into account data acquired from a field experiment to study the effects of three fertilization treatments on yield of *Opuntia ficus-indica* L. The developed boundary-line approach standards were compared with already developed compositional nutrient diagnosis norms for N, P, K, Ca, and Mg concentrations in one-year old cladodes, and cladodes fresh matter as yield in order to define correct nutrient standards. The developed boundary-line approach optimum nutrient concentrations (associated to estimated maximum yield) for *Opuntia ficus-indica* L. are: N = 1.42 %, P = 0.38 %, K = 4.55 %, Ca = 2.83 % and Mg = 1.41 %. Results suggest that boundary-line approach estimated standards could be trustful and that lower and upper concentrations of the boundary-line approach sufficiency nutrient ranges could be also reliable as well as those for compositional nutrient diagnosis norms.

**ADDITIONAL KEY WORDS:** plant nutrition, CND norms, BLA standards.

## COMPARACIÓN ENTRE NORMAS DNC Y ESTÁNDARES NUTRIMENTALES DE LA TÉCNICA DE CURVA LÍMITE: CASO *Opuntia ficus-indica* L.

### RESUMEN

Es necesario conocer las concentraciones óptimas e intervalos óptimos de nutrientes útiles para el diagnóstico correcto y el mejoramiento de la condición nutricional de las plantas cultivadas. Reconocer la necesidad de identificar normas nutrimentales correctas, es conveniente para mejorar o garantizar la confiabilidad de las ya definidas. Al tomar en cuenta ese objetivo, la técnica de línea límite se usó para identificar concentraciones óptimas y rangos de suficiencia al 95 % del rendimiento máximo al tomar en cuenta los datos obtenidos de un experimento de campo desarrollado con el fin de estudiar los efectos de tres tratamientos de fertilización sobre el rendimiento de *Opuntia ficus-indica*. Las normas de la técnica de línea límite, producto del presente trabajo, se

compararon con las normas de diagnóstico de nutrimento compuesto ya desarrolladas para los casos de concentraciones de N, P, K, Ca y Mg en cladodios de un año de edad, en su relación con materia fresca de cladodios como rendimiento con el fin de identificar normas nutrimentales correctas. Las concentraciones óptimas identificadas con la técnica de línea límite para *Opuntia ficus-indica* L. son las siguientes: N = 1.42 %, P = 0.38 %, K = 4.55 %, Ca = 2.83 % y Mg = 1.41 %. Los resultados sugieren que las normas estimadas mediante la técnica de línea límite son confiables; además, las concentraciones inferior y superior de los intervalos de suficiencia de los cinco nutrimentos son tan confiables como las asociadas a las normas de diagnóstico de nutrimento compuesto.

**PALABRAS CLAVE ADICIONALES:** nutrición vegetal, normas de nutrimento compuesto, normas de la técnica de línea límite.

## INTRODUCTION

In many respects, improvements of soil fertility and efficient use of mineral nutrients is of high ecological and economic importance. Use of basic and practical research information provided through plant nutrition studies will play a decisive role in establishing efficient and ecologically based nutrient management systems. Special attention should be paid to plant nutrients to ensure further increases in yield and sustained soil fertility. Development and application of precise cultural practices that ensure an adequate and balanced supply of nutrients to crop plants is a high priority research area of plant nutrition in order to increase productivity and maintain the fertility of cultivated soils.

Among these precise practices are the correct diagnosis and improvements of the nutrient status of plants. They provide further valuable impacts on the health and quality of plants, animals and humans. For instance, there are several excellent examples showing that plants with high-balanced levels of nutrients are better adapted to biotic and abiotic stress factors, such as fungal diseases, metal toxicities, salinity and photo-oxidative stress caused by low temperature, drought stress and high irradiation (Loneragan, 1997; Cakmak, 2000). In addition, it is expected a good relationship between the plant nutrient status and crop performance (Dow and Roberts, 1982) when involved nutrient is a limiting factor. By these reasons, it is a need to know optimum concentrations and/or optimum ranges of nutrients useful for correct diagnosis and improvements of nutrient status of cultivated plants.

In diagnosis of nutrient status, the analysis of plant tissues has been used because plant composition is an indicator of plant response more sensitive than yield, but at the same time is much more difficult to interpret (Melsted *et al.*, 1969). The diagnosis of plant nutritional status was first based on the interpretation of single-nutrient concentrations (Bates, 1971) and later on bi-variate ratios. Used approaches are critical values for the single-nutrient for the first case; and simple ratios, and diagnosis and recommendation integrated system (DRIS), among others, for the second case. However, recently Parent and Dafir (1992) introduced compositional nutrient diagnosis (CND) approach to consider the effects of the multivariate nature of nutrient interactions. Such an approach, CND ensures that the variation in one element in plant tissue inevitably changes the proportion of the other elements. This method allows the computation of multivariate nutrient ratios that

are more representative of the compositional nature of plant tissue (Aitchison, 1986). CND has been proven with yearly crops (Parent y Dafir, 1992; Parent *et al.*, 1994; Khiari *et al.*, 2001ab; Magallanes *et al.*, 2006), and perennial species (Magallanes *et al.*, 2004; Vizcaíno-Soto y Côté, 2004; Blanco-Macías *et al.*, 2006; Quesnel *et al.*, 2006).

Recognizing the need to develop correct nutrient standards, it is convenient to improve or to ensure the reliability of those already determined. There are known several ways to do it. One of them is to modify the standards by increasing the data base. Also, new optimum values can be determined through other techniques such as regression analysis of relationships between site index and foliar-nutrient concentrations from several stands at local or regional level (Quesnel *et al.*, 2006). Another way is to contrast nutritional standards derived from different techniques. By using this strategy, Vizcayno-Soto and Côté (2004) found that boundary-line approach (BLA) yielded nutritional standards for sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) comparable to those already computed by the CND technique.

Blanco-Macías *et al.* (2006) developed CND nutrient standards for *Opuntia ficus-indica* L. (Table 1), an important crop in Mexico due to its tender pads are widely used for human consumption as vegetables, whereas mature cladodes are used for animal feed; in Mexico, 11,344 ha are used for tender pads production and 4,672 ha for forage production (SAGARPA-SIAP, 2006). However, there remains the idea of whether these standards are correct. Then, to contrast such nutrient norms with others estimated through at least a different approach deserve be performed. Therefore, the main aims of this research were i) to determine nutrient standards using BLA, and ii) to contrast both CND and BLA nutrient norms.

## MATERIALS AND METHODS

### Data

This study is based on data acquired from a field experiment to test three fertilization treatments and three varieties of *Opuntia ficus-indica* ('Jalpa', 'Villanueva' and 'Copena V1'). Within the experimental plot, a plant density of 10,000 plants per hectare was used. We are considering data from 36 plants (12 of each variety). Data corresponds to a database (n = 252) of the concentration of N, P, K, Ca and Mg in one-year old cladodes of *Opuntia ficus-indica*,

and cladodes fresh matter as yield. All data are associated to one-year cladodes harvested from plants having the same structure through formation-pruning practice. The cut cladodes were growing on nine cladodes at the second level from the mother cladode, from February to March of each year: 2001, 2002, 2003, and 2004. Nutrient concentrations were estimated through conventional approaches after acid digestion of the dry tissue samples: N by vapor efflux, P by reduction with molibdo-vanadate, and K, Ca and Mg by spectrophotometric techniques. Interested readers are encouraged to review Magallanes Quintanar *et al.* (2004) and Blanco-Macías *et al.* (2006) papers.

### Compositional nutrient diagnosis norms

Compositional nutrient diagnosis norms, developed by Blanco-Macías *et al.* (2006), were compared with BLA standards developed in this research work. These CND norms were calculated using CND approach, as described in Parent and Dafir (1992), Khiari *et al.* (2001ab), García-Hernández *et al.* (2004), Magallanes-Quintanar *et al.* (2004), García-Hernández *et al.* (2005), Magallanes-Quintanar *et al.* (2006) and Blanco-Macías *et al.* (2006), and using the database ( $n = 252$ ) described *ut supra*. The consigned CND norms as means and standard deviations of the row-centered

log ratios  $V_N^*$ ,  $V_P^*$ ,  $V_K^*$ ,  $V_{Ca}^*$ ,  $V_{Mg}^*$  and  $V_{R_d}^*$ , and the corresponding nutrient optimum concentrations and their standard deviations for cladodes fresh matter production with a yield cutoff value of reference of  $46.7 \text{ kg}\cdot\text{plant}^{-1}$  are presented in Table 1.

**TABLE 1.** *Opuntia ficus-indica* L. compositional nutrient diagnosis (CND) norms (row-centered log ratios, RCLR, and standard deviations, SD) for  $d = 5$  nutrients in a high-yield subpopulation producing more than  $46.7 \text{ kg}\cdot\text{plant}^{-1}$  of cladodes fresh matter, and their associated nutrient mean concentrations and standard deviations (SD) (Blanco-Macías *et al.*, 2006).

CND nutrient norms			Associated mean nutrient concentrations and standard deviations		
RCLR	Mean	SD	Nutrient	Mean	SD
$V_N^*$	-0.98	0.35	N (%)	1.29	0.47
$V_P^*$	-2.23	0.21	P (%)	0.36	0.08
$V_K^*$	0.25	0.19	K (%)	4.24	0.88
$V_{Ca}^*$	0.37	0.35	Ca (%)	4.96	1.73
$V_{Mg}^*$	-0.71	0.17	Mg (%)	1.61	0.27
$V_{R_5}^*$	3.29	0.09			
$\sum V_X$	0				

### The boundary-line approach standards

The boundary-line approach standards were developed taking into account data ( $n = 252$ ) acquired from the field experiment described above. The boundary-line is formed when all values for two variables are plotted and a line enclosing these points is established (Michael *et al.*, 1985). The line represents the limiting effect of the independent variable on the dependent variable (Webb, 1972; Lark, 1997), and thus is assumed that all values below it result from the influence of another independent variable or a combination of variables that are limiting the dependent variable (Webb, 1972; Hinkley *et al.*, 1978).

There are several approaches to select the points to define the boundary-line. Involving the Blanco-Macías *et al.* (2006) database ( $n = 252$ ) for *Opuntia ficus-indica*, the boundary-line for each nutrient (N, P, K, Ca and Mg) was estimated when used as independent variable vs. yield as response, according to the following procedure:

The first step consisted in plotting data of cladodes nutrient concentration (%) vs. cladodes fresh matter ( $\text{kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ ) as yield. Then, each bivariate relation was used in order to analyze the distribution pattern, to determine its suitability and potential use, and to remove obvious outliers. For instance, Figure 1a shows this step results for nitrogen (N) concentration.

The second step was the selection of the points located on the upper limit of the scatter diagram. It was performed by dividing the nutrient concentration range (independent variable) in classes by using the OpenStat software (2008) and selecting only the highest point for each interval. The rationale for taking into account representative points of classes was based on two criteria: (1) to use at least 10 representative observations to develop the model in order to limit the selection of points to the superior boundary of the scatter of points, and (2) to maximize the likelihood of developing statistically significant models by increasing the number of observations ( $>10$ ). The choice of a number of boundary points which are used to estimate a boundary-line in one scatter diagram represents a compromise between the two aims of big group sizes and a high number of boundary points (Schmidt *et al.*, 2000). These conditions are prerequisites for a reliable definition of boundary points and estimation of boundary lines, respectively. As a result we considered at least 10 points enough by taking into account the distribution of points in each scatter diagram and sample size ( $n = 252$ ). For instance, Figure 1b shows the 18 representative observations relating N concentration and *Opuntia ficus-indica* yield.

The third step consisted of fitting a second degree polynomial function. It can be appreciated in Figure 1c taking into account N concentration vs. yield. When the second-degree function is not appreciated by eye and instead appears a triangular shape, a set of two linear functions

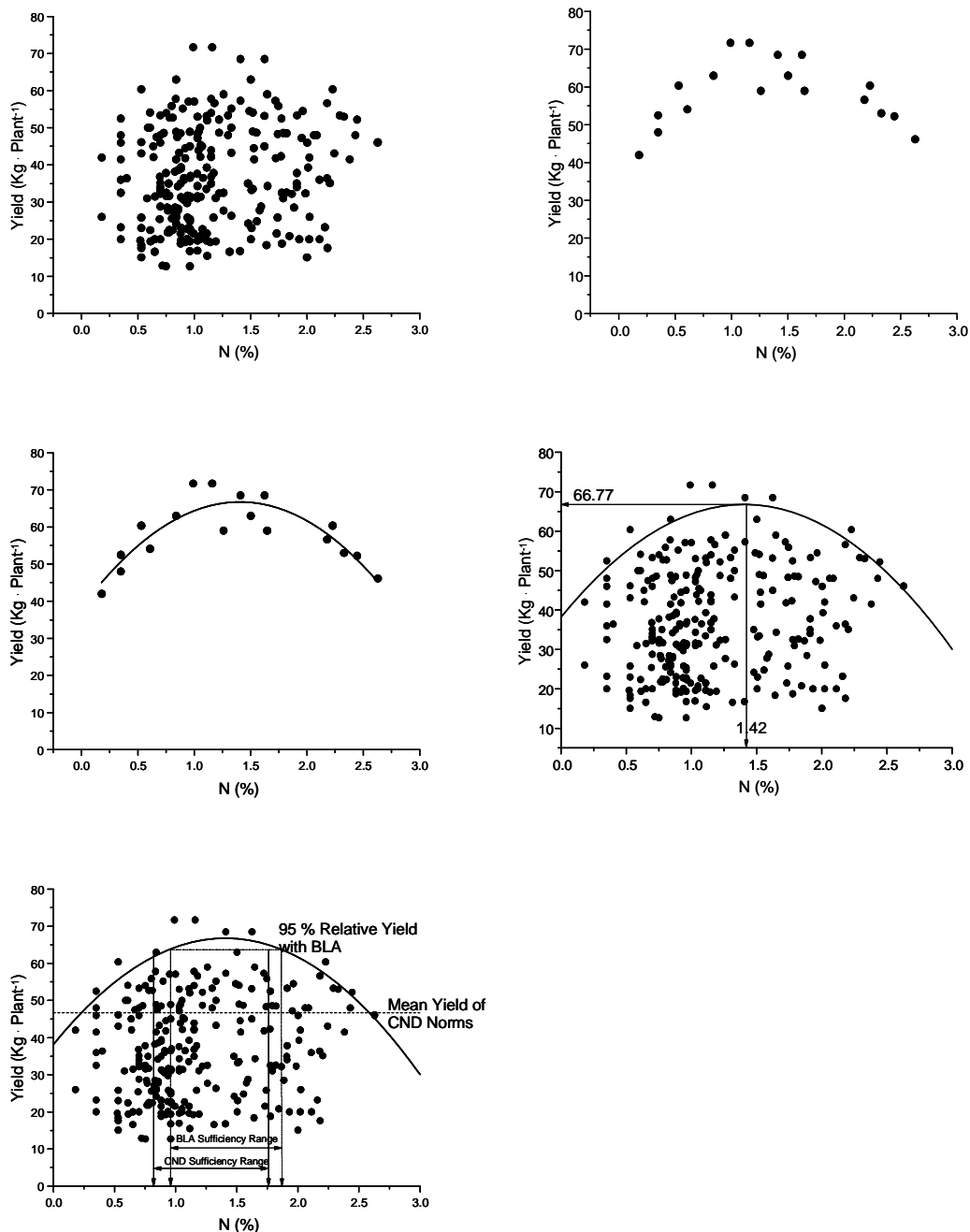


FIGURE 1. The different steps of the boundary-line approach as applied to nitrogen (N) concentration and yield ( $\text{kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ ) of *Opuntia ficus-indica* L.

could be used. It is logical to search survey data for the characteristic triangular pattern among maximum values of level of nutrient and yield (Walworth *et al.*, 1986; Evanlyo and Sumner, 1987; Righetti *et al.*, 1990). It is possible to estimate the optimum nutrient concentration by calculating the value corresponding to a slope of zero for the second-degree polynomial regression as is clearly appreciated in Figures 1c, d, e for N concentration. In the case that triangular shape appears, the optimum concentration could be estimated by choosing the crossing point between the two straight lines. The optimum range was assessed by solving the second-degree polynomial regression for the

nutrient concentrations corresponding to 95 % of relative yield, as shown for N case in Figure 1e. When a couple of straight lines is used, this nutrient range could be elucidated under the basis of 95 % of relative yield value for both linear functions.

#### Comparison between CND norms and BLA nutrient standards

Comparison of results from both approaches was performed taking into account optimum concentrations and ranges of sufficiency.

## RESULTS AND DISCUSSION

### The boundary-line approach standards

In each of the scatter diagrams most of the data points grouped at the bottom, i.e. at a low yield level (Figures 1, 2, 3, 4, 5). High-yields were only rarely measured across each interval considered, thus selection of representative points was easy. So, we were able to choose >10 points at the upper edge of each data body. However, drawing boundary-lines by hand is an uncertain and not reproducible method. Thus, procedure proposed in this study was developed to overcome this uncertainty.

There, each of all five nutrients vs. yield scatter diagrams showed to have a boundary-line model developed without correction for outliers. The boundary-lines were estimated using representative observations for all defined classes. The boundary-line fitted by a second-degree function was observed for N, P, and K, with 18, 17, and 11 intervals, as appreciated in Figures 1, 2, and 3, respectively. The Boundary-lines for Ca with 14 observations, and Mg with 11 points were described through two straight lines, because they had triangular-shaped scatter distributions (Figures 4 and 5).

Blanco-Macías *et al.* (2006) data base ( $n = 252$ ) allow for the successful application of a boundary-line approach to assess nutrient standards through fitting significant ( $P < 0.01$ ) second-degree polynomial or straight functions for N, P, K, and Mg (Table 2); exception corresponds to Ca ( $P < 0.09$ ). Models for N, K, and Mg had high  $R^2$  values ( $R^2 > 0.6$ ), whereas those for P and Ca were low ( $R^2 < 0.6$ ) as appreciated in Table 2. These results may be due to the wide range of Ca concentration in cladodes of *Opuntia ficus-indica* L. and to the fewer data in the upper region of the scatter diagram. This late aspect also applies for P case. In this context, Vizcayno-Soto and Côte (2004) pointed out improvements in  $R^2$  by increasing intervals, but lower levels of probability. Thus, BLA would appear to be particularly appropriate for N, P, K, and Mg. In addition, it appears scatter point distributions with large spread of nutrient concentrations (for instance Ca in this study) require a large number of points to optimize the yield of the BLA. It deserves be mentioned *Opuntia ficus-indica* is a rare calcitrophic species (Lüttge, 2004) and that experimental soil is rich in available Ca (Blanco-Macías *et al.*, 2006) which explain the large spread of Ca concentrations.

It is interesting to point out all five optimum nutrient concentrations related to maximum yield scores estimated by the BLA (Figures 1-5) are >38 % higher than target yield ( $46.7 \text{ kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ ) used for dividing the whole database ( $n = 252$ ) and to develop the CND norms by Blanco-Macías *et al.* (2006). This result suggests that BLA estimated optimum nutrient concentrations could be trustful. Moreover, yields associated to sufficiency nutrient ranges estimated through

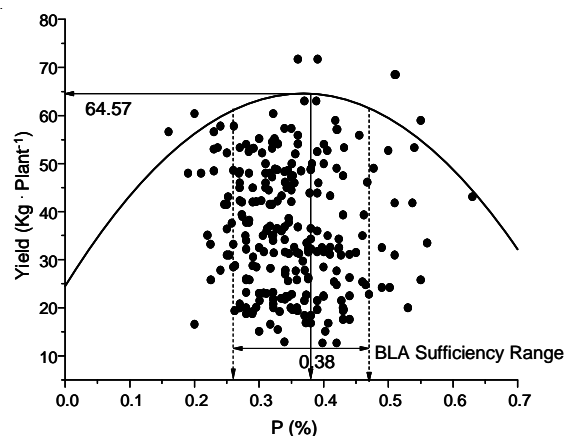


FIGURE 2. The relationship between phosphorus (P) nutrient concentration and *Opuntia ficus-indica* L. yield ( $\text{kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ ) showing boundary line described by a second degree function.

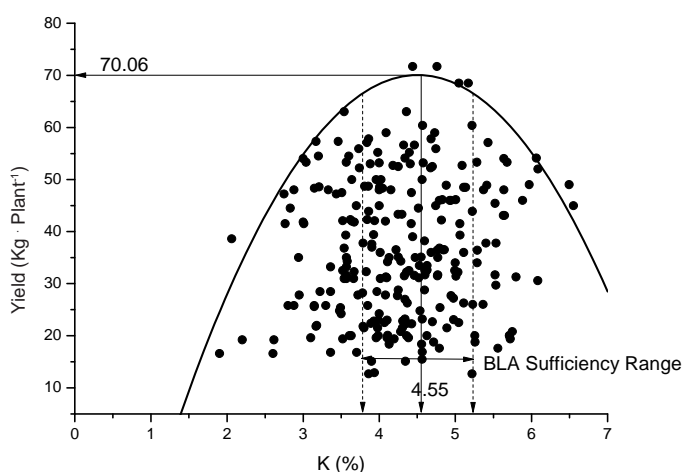


FIGURE 3. The relationship between potassium (K) nutrient concentration and *Opuntia ficus-indica* L. yield ( $\text{kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ ) showing boundary line described by a second degree function.

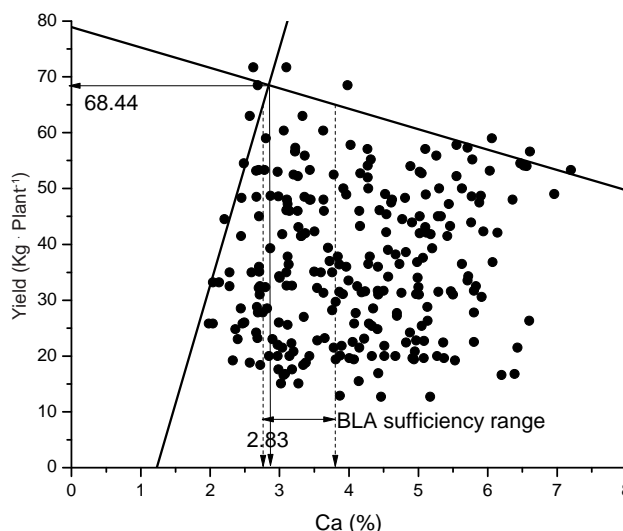


FIGURE 4. The relationship between calcium (Ca) nutrient concentration and *Opuntia ficus-indica* L. yield ( $\text{kg}\cdot\text{plant}^{-1}$ ) showing boundary lines (straight lines).



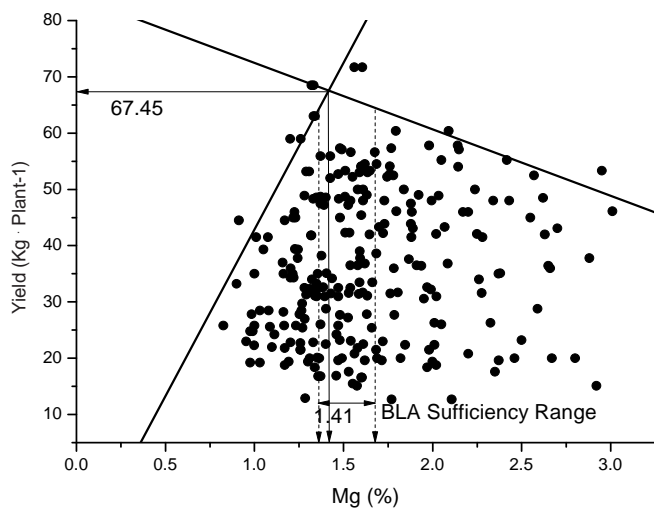


FIGURE 5. The relationship between magnesium (Mg) nutrient concentration and *Opuntia ficus-indica* L. yield (kg·plant<sup>-1</sup>) showing boundary lines (straight lines).

TABLE 2. Statistics of boundary lines fitted by second-degree or linear functions used to estimate *Opuntia ficus-indica* L. nutrient standards.

Nutrient, and function(s)	R <sup>2</sup>	Probability
N Y = 38.16+40.67x-14.46x <sup>2</sup>	0.74	0.00001
P Y = 24.46+217.62x-295.19x <sup>2</sup>	0.45	0.00571
K Y = -66.01+60.36x-6.69x <sup>2</sup>	0.90	0.00004
Ca Y = -52.27+42.49x	0.73	0.0957
Y = 78.93-3.66x	0.58	0.00604
Mg Y = -16.35+59.23x	0.86	0.00516
Y = 84.28-11.81x	0.69	0.05164

TABLE 3. *Opuntia ficus-indica* L. compositional nutrient diagnosis (CND) and Boundary-line Approach (BLA) optimum nutrient concentrations and ranges of sufficiency.

Nutrient	CND		BLA	
	Optimum concentration	Range	Optimum concentration	Range (95 % of maximum yield)
N (%)	1.29	0.82 - 1.76	1.42	0.92 - 1.89
P (%)	0.36	0.28 - 0.44	0.38	0.26 - 0.47
K (%)	4.24	3.36 - 5.12	4.55	3.78 - 5.23
Ca (%)	4.29	3.23 - 6.69	2.83	2.76 - 3.80
Mg (%)	1.61	1.34 - 1.88	1.41	1.36 - 1.71

BLA (Table 3) are 31 % higher than target yield mentioned *ut supra*. Then, these results suggest lower and upper concentrations of the BLA sufficiency nutrient ranges could be also reliable.

## Comparison between CND norms and BLA nutrient standards

Contrasting the optimum CND scores with those estimated in this study using BLA allow to identify optimum CND scores for Ca (4.29 %) and Mg (1.81 %) are higher than optimum BLA concentrations (Ca = 2.83 %, Mg = 1.41 %) (Table 3). Curiously, both cases show to have triangular-shaped positively skewed distributions. Thus, such results could be attributed to skew, and suggest sample size must be increase to have a normal distribution of data or study them using a data transformation strategy. On the other hand, optimum CND concentrations for N (1.29 %), P (0.36 %), and K (4.24 %) were slightly lower than the optimum BLA scores (N = 1.42, P = 0.38, and K = 4.55 %). This latter difference indicates that *Opuntia ficus-indica* L. plants yield well at slightly higher concentrations than optimum CND scores reported by Blanco-Macías *et al.* (2006).

Concerning optimum ranges, there are several interesting differences. Lower and upper BLA scores are slightly higher than CND values. This implies CND sub-estimated or BLA over-estimated N optimum range, but really difference is almost nil. Both ranges for P are practically equal. The K case is similar to that of N. CND optimum range for Ca (3.23 - 6.69 %) is circumscribed to BLA optimum range (2.76 - 3.8 %), which indicates the former could be more sensitive when Ca diagnosis is performed. The lower BLA score for Mg is slightly higher than that associated to CND technique; however, the higher BLA Mg value is slightly lower than that for CND approach. There is also remarkable BLA ranges for N and P (0.9 and 0.21 %, respectively) are slightly larger than those estimated from CND method (0.94 and 0.16 % for N and P, respectively), and that BLA sufficiency ranges for K, Ca, and Mg (1.45, 1.04, and 0.35 %, respectively) are lower than optimum ranges (1.76, 3.46, and 0.54 % for K, Ca, and Mg, respectively) as defined by Blanco-Macías *et al.* (2006) using CND procedure.

## CONCLUSIONS

The boundary-line fitted by a second-degree function was observed for N, P and K. The Boundary-lines for Ca, and Mg were described trough two straight lines, because they had skewed triangular-shaped scatter distributions.

Optimum boundary-line approach scores were as follows: N = 1.42 %, P = 0.38 %, K = 4.55 %, Ca = 2.83 % and Mg = 1.41 %. These for N, P, and K were slightly higher than those corresponding to CND norms. However, for Ca and Mg, BLA optimum concentrations were strongly lower than those associated to CND norms, especially for Ca.

When ranges of sufficiency for both approaches were compared, there appear no important differences although procedures for their estimation are really different.

Boundary-line approach estimated standards could be trustful, and lower and upper concentrations of the BLA sufficiency nutrient ranges could be also reliable as well as CND norms.

### ACKNOWLEDGEMENTS

FBM acknowledge financial support from CONACYT during his Ph.D. studies. This research work was supported in part by the 'Programa de Investigación en Fruticultura, Universidad Autónoma Chapingo' through grant Núm. 09230308.

### LITERATURE CITED

- AITCHISON, J. 1986. Statistical Analysis of Compositional Data. Chapman and Hall, New York.
- BATES, T. E. 1971. Factors affecting critical nutrient concentrations in plant and their evaluation: A review. *Soil Science* 112: 116-130.
- BLANCO-MACÍAS, F.; LARA-HERRERA, A.; VALDEZ-CEPEDA, R. D., CORTÉS-BAÑUELOS, J. O., LUNA-FLORES, M., SALAS-LUEVANO, M. A. 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.
- CAKMAK, I. 2000. Role of zinc in protecting plant cells from reactive oxygen species. *New Phytologist* 146: 185-205.
- DOW, A. I.; ROBERTS, S. 1982. *Proposal: Critical nutrient ranges for crop diagnosis*. *Agronomy Journal* 74: 401-403.
- EVANLYO, G. K.; SUMNER, M. E. 1987. Utilization of the boundary line approach in the development of soil nutrient norms for soybean production. *Communications in Soil Science & Plant Analysis* 18: 1379-1401.
- GARCÍA-HERNÁNDEZ, J.; VALDEZ-CEPEDA, R. D.; MURILLO-AMADOR, B.; NIETO-GARIBAY, A.; BELTRÁN-MORALES, L. F.; MAGALLANES-QUINTANAR, R.; TROYO-DIÉGUEZ, E. 2004. Compositional nutrient diagnosis and main nutrient interactions in yellow pepper grown on desert calcareous soils. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science* 167: 509-515.
- GARCÍA-HERNÁNDEZ, J. L.; VALDEZ-CEPEDA, R. D.; ÁVILA-SERRANO, N. Y.; MURILLO-AMADOR, B.; NIETO-GARIBAY, A.; MAGALLANES-QUINTANAR, R.; LARRINAGA-MAYORAL, J.; TROYO-DIÉGUEZ, E. 2005. Preliminary compositional nutrient diagnosis norms for cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) grown on desert calcareous soil. *Plant & Soil* 271(1-2): 297-307.
- HINCKLEY, T. M.; ASLIN, R. G.; AUBUCHON, R. R.; METCALF, C. L.; ROBERTS, J. E. 1978. Leaf conductance and photosynthesis in four species of the oak-hickory forest type. *Forest Science* 24: 73-84.
- KHIARI, L.; PARENT, L. E.; TREMBLAY, N. 2001a. Selecting the high-yield subpopulation for diagnosing nutrient imbalance in crops. *Agronomy Journal* 93: 802-808.
- KHIARI, L., PARENT, L. E., TREMBLAY, N. 2001b. The phosphorus composition nutrient diagnosis range for potato. *Agronomy Journal* 93(4): 815-819.
- LARK, R. M. 1997. An empirical method for describing the joint effects of environmental and other variables on crop yield. *Annals of Applied Biology* 131: 141-159.
- LONERAGAN, J. F. 1997. Plant nutrition in the 20th and perspectives for the 21st century. *Plant & Soil* 196: 163-174.
- LÜTTGE, U. 2004. Ecophysiology of crassulacean acid metabolism (CAM). *Annals of Botany* 93: 629-652.
- MAGALLANES-QUINTANAR, R.; VALDEZ-CEPEDA, R. D.; BLANCO-MACÍAS, F.; MÁRQUEZ-MADRID, M.; RUÍZ-GARDUÑO, R. R.; PÉREZ-VEYNA, O.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, J. L.; MURILLO-AMADOR, B.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. D.; MARTÍNEZ-RUBÍN DE CELIS, E. 2004. Compositional nutrient diagnosis in nopal (*Opuntia ficus-indica*). *Journal of the Professional Association for Cactus Development* 6: 78-89.
- MAGALLANES-QUINTANAR, R.; VALDEZ-CEPEDA, R. D.; OLIVARES-SÁENZ, E.; PÉREZ-VEYNA, O.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, J. L. 2006. Compositional nutrient diagnosis in maize grown in a calcareous soil. *Journal of Plant Nutrition* 29: 2019-2033.
- MELSTED, S. W.; MOTTO, H. L.; PECK, T. R. 1969. Critical plant nutrient composition values useful in interpreting plant analysis data. *Agronomy Journal* 61:17-20.
- MICHAEL, D. A.; DICKMAN, D. I.; GOTTSCHALK, K. W.; NELSON, N. D.; ISEBRANDS, J. G. 1985. Determining photosynthesis of tree leaves in the field using a portable <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> apparatus: procedures and problems. *Photosynthetica* 19: 98-108.
- MILNE, A. E.; FERGUSON, R. B.; LARK, R. M. 2006. Estimating a boundary line model for a biological response by maximum likelihood. *Annals of Applied Biology* 149: 223-234.
- OPENSTAT. 2008. Written by William G. Miller. E-mail: openstat@msn.com
- PARENT, L. E.; DAFIR, M. 1992. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 117: 239-242.
- PARENT, L. E.; CAMBOURIS, A. N.; MUHAWENIMANA, A. 1994. Multivariate diagnosis of nutrient imbalance in potato crops. *Soil Science Society of America Journal* 58: 1432-1438.
- QUESNEL, P. O.; CÔTÉ, B.; FYLES, J.; MUNSON, A. 2006. Optimum nutrient concentrations and CND scores of mature white spruce determined using a boundary-line approach and spatial variation of tree growth and nutrition. *Journal of Plant Nutrition* 29 (11): 1999-2018.
- RIGHETTI, T. L.; WILDER, K. L.; GUMMINGS, G. A. 1990. Plant Analysis as an Aid to Fertilizing Orchard Crops. pp. 563-601. *In: R. L. WESTERMAN (ed.). Soil Testing and Plant Analysis*. American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.
- SAGARPA-SIAP. 2006. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola. Ciclo: cíclicos y perennes 2006. Modalidad: riego + temporal. México. <http://www.siap.gob.mx/>. Consultado el 12 de noviembre de 2007.
- SCHMIDT, U.; HANSPETER, T.; KAUPENDJOHANN, M. 2000. Using a boundary line approach to analyze N<sub>2</sub>O flux data from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agricultural Ecosystems* 57: 119-129.
- VIZCAÍNO-SOTO, G.; CÔTÉ, B. 2004. Boundary line approach to determine standards of nutrition for mature trees from spatial variation of growth and foliar nutrient concentrations in natural environments. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 35: 2965-2985.
- WALWORTH, J. L.; LETZSCH, W. S.; SUMNER, M. E. 1986. Use of boundary lines in establishing diagnostic norms. *Soil Science of America Journal* 50: 123-128.
- WEBB, R. A. 1972. Use of the boundary line in the analysis of biological data. *Journal of Horticultural Science* 47: 309-319.



## Estimation of nutritional reference values for *Opuntia ficus-indica* L. by means of the Boundary-line approach

Journal:	<i>Journal of Plant Nutrition and Soil Science</i>
Manuscript ID:	jpln.200900147.R5
Wiley - Manuscript type:	Regular Article
Date Submitted by the Author:	n/a
Complete List of Authors:	Blanco-Macías, Fidel; Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional Universitario Centro Norte Magallanes-Quintanar, Rafael; Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica Valdez-Cepeda, Ricardo; Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional Universitario Centro Norte; Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Matemáticas Vázquez-Alvarado, Rigoberto; Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía Olivares-sáenz, Emilio; Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía Gutiérrez-Ornelas, Erasmo; Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía Vidales-Contreras, Juan Antonio; Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía Murillo-Amador, Bernardo; Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste, S.C., Programa de Agricultura de Zonas Áridas
Research Area:	Nutrients and yield formation
Manuscript Keyword:	Plant Nutrition, BLA standards, CND norms, Nutrient norms, Yield



1  
2  
3  
4  
5  
6  
7  
8  
9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

1 **Estimation of nutritional reference values for *Opuntia ficus-indica* L. by**  
2 **means of the Boundary–line approach**

3 F. Blanco–Macías<sup>1,2</sup>; R. Magallanes–Quintanar<sup>3</sup>; R.D. Valdez–Cepeda<sup>1,4¶</sup>; R. Vázquez–  
4 Alvarado<sup>5</sup>, E. Olivares–Sáenz<sup>5</sup>; E. Gutiérrez–Ornelas<sup>5</sup>; J.A. Vidales–Contreras<sup>5</sup>; B. Murillo–  
5 Amador<sup>6</sup>

6 <sup>1</sup>*Universidad Autónoma Chapingo, Centro Regional Universitario Centro–Norte. Cruz del Sur*  
7 *No. 100, Col. Constelación. Apdo. Postal 196, CP 98085, El Orito, Zacatecas, Zac., México.*

8 <sup>2</sup>*Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía. Km 17.5, Carretera Zuazua–*  
9 *Marín. CP 66700. Marín, N.L., México.*

10 <sup>3</sup>*Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica. Ave. R. López*  
11 *Velarde 801, CP 98064, Zacatecas, Zac., México.*

12 <sup>4</sup>*Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Matemáticas. Paseo Solidaridad*  
13 *s/n. CP 98064, Zacatecas, Zac., México.*

14 E–mail: vacrida@hotmail.com (¶Author for correspondence).

15 <sup>5</sup>*Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Agronomía. Km 17.5, Carretera Zuazua–*  
16 *Marín. CP 66700. Marín, N.L., México.*

17 <sup>6</sup>*Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, Mar Bermejo No. 195, Col. Playa Palo de*  
18 *Santa Rita. La Paz, Baja California Sur, México.*

19  
20 **Keywords:** *Plant Nutrition; BLA standards; CND norms; Nutrient norms; Yield.*

21 **Note:** This contribution is part of the first author's (Mr. Fidel Blanco–Macías) Ph. D. thesis.

## 22 Abstract

23 Optimum concentrations and/or sufficiency ranges of nutrients are useful for a correct diagnosis  
24 and improvement of nutrient status of cultivated plants. To develop boundary–line approach  
25 (BLA) standards for *Opuntia ficus–indica* L., a database of N, P, K, Ca, and Mg concentrations in  
26 one–year old cladodes and cladodes fresh matter yield was used. Developed BLA optimum  
27 concentrations (associated to estimated maximum yield) for *O. ficus–indica* were: N = 13.1 g kg<sup>-1</sup>  
28 <sup>1</sup>, P = 3.2 g kg<sup>-1</sup>, K = 44.4 g kg<sup>-1</sup>, Ca = 38.1 g kg<sup>-1</sup>, and Mg = 17.3 g kg<sup>-1</sup>. Estimated BLA  
29 sufficiency ranges at 95% yield were 8.4 – 20.3 g kg<sup>-1</sup> for N, 2.4 – 4.2 g kg<sup>-1</sup> for P, 38.2 – 50.8 g  
30 kg<sup>-1</sup> K, 31.8 – 45.2 g kg<sup>-1</sup> for Ca, and 14.3 – 20.9 g kg<sup>-1</sup> for Mg. Boundary–line approach  
31 estimated standards are comparable to those obtained in a previous study using compositional  
32 nutrient diagnosis approach.

33

## 1 Introduction

Improvements of soil fertility and efficient use of mineral nutrients by plants are considered of high ecological and economic importance. Use of basic and practical research information provided by means of plant nutrient studies will play an important role for establishing efficient and ecologically based nutrient management systems. Special attention should be paid to plant nutrients to ensure further increases in yield and to maintain soil fertility. A correct diagnosis and improvement of the plants' nutrient status benefit not only the health and quality of plants, but also animal and human nutrition. There are several excellent examples showing that plants with adequate levels of nutrients are better adapted to biotic and abiotic stress factors, such as fungal diseases, metal toxicities, salinity and photo-oxidative stress caused by low temperature, drought stress and high irradiation (Loneragan, 1997; Cakmak, 2000). In addition, a good relationship usually exists between plant nutrient status and crop performance (Dow and Roberts, 1982) when the involved nutrient is a limiting factor. Based on these reasons, there is a need to know optimum concentrations and/or sufficiency ranges of nutrients useful for correct diagnosis and improvements of nutrient status of cultivated plants.

In diagnosis of nutrient status, the analysis of plant tissues has been used since plant composition is a more sensitive indicator of plant response than yield; however, it is more difficult to interpret (Melsted *et al.*, 1969). Diagnosis of plant nutrient status was first based on the interpretation of single-nutrient concentrations (Bates, 1971) and later on bi-variate ratios (Quesnel *et al.*, 2006). Critical values (CV's) for the single-nutrient were used for the first case and simple ratios for diagnosis and recommendation integrated system (DRIS), among others were used for the second case. However, Parent and Dafir (1992) introduced the compositional nutrient diagnosis (CND) concept to consider the effects of the multivariate nature of nutrient interactions. Such an

1  
2  
3 57 approach recognizes that the variation in one element in plant tissue changes the proportion of the  
4  
5 58 other elements (Quesnel *et al.*, 2006). This method allows estimations for multivariate nutrient  
6  
7  
8 59 ratios that are representative of the compositional nature (Aitchison, 1986) of plant tissue. The  
9  
10 60 CND technique has been tested with annual crops (Parent *et al.*, 1993, 1994; Khiari *et al.*, 2001a,  
11  
12 61 2001b; García-Hernández *et al.*, 2004, 2005; Magallanes-Quintanar *et al.*, 2006), and perennial  
13  
14 62 species (Magallanes-Quintanar *et al.*, 2004; Vizcaíno-Soto and Côté, 2004; Blanco-Macías *et*  
15  
16 63 *al.*, 2006; Quesnel *et al.*, 2006).

17  
18  
19 64 In Mexico and other countries throughout the world, *Opuntia ficus-indica* L. is an important crop  
20  
21 65 since tender shoots are widely used for human consumption as vegetables and mature cladodes  
22  
23 66 (stems) are used for animal feed. Blanco-Macías *et al.* (2006) proposed nutrient standards for *O.*  
24  
25 67 *ficus-indica* L.; however, those standards have not been adequately validated.

26  
27  
28  
29 68 To develop reliable nutrient standards, it is most efficient to improve the accuracy of those  
30  
31 69 already determined. One approach is to modify the standards by increasing size of the data base.

32  
33  
34 70 In addition, new maximum values can be determined through other techniques such as regression  
35  
36 71 analysis of relationships between site index and foliar-nutrient concentrations from several stands  
37  
38 72 at local or regional level (Quesnel *et al.*, 2006). Another approach is to contrast nutrient standards  
39  
40 73 derived from different techniques. By using this strategy, Vizcaíno-Soto and Côté (2004) found  
41  
42 74 that the boundary-line approach (BLA) yielded nutrient standards for sugar maple (*Acer*  
43  
44 75 *saccharum* Marsh.) comparable to those already computed by the CND technique. In the present  
45  
46 76 study, we chose to contrast the mentioned CND nutrient norms for *O. ficus-indica* L. with those  
47  
48 77 estimated through a different approach. Therefore, the main aims of this research were i) to  
49  
50 78 determine nutrient standards using BLA, and ii) to contrast both CND and BLA nutrient norms  
51  
52 79 for *O. ficus-indica* L.  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

## 81 2 Materials and Methods

82 An experiment was established in April, 1999 in the experimental field of the 'Centro Regional  
83 Universitario Centro Norte' of the 'Universidad Autónoma Chapingo' at 22° 44' 49.6'' North  
84 latitude, 102° 46' 28.2'' West longitude, and 2 296 masl, located near Zacatecas city, Mexico.  
85 Climate characterizing the region can be classified as BS1kw(w) which corresponds to the least  
86 dry of the dry steppe type, with a mean annual temperature ranging between 12 and 18°C and a  
87 yearly average precipitation of 472 mm. Most of the precipitation (65%) occurs from June to  
88 August.

89 The field experiment was carried out in order to study the effects of four fertilization treatments  
90 (randomly distributed in three blocks) on yield of *O. ficus-indica* L. Thus, there were 36  
91 experimental units. Each experimental unit had 12 plants. However, demonstrating effects of  
92 treatments on yield is out of scope of this paper. Within the experimental plot, a density of 10 000  
93 plants of *O. ficus-indica* L. per hectare was used.

### 94 2.1 Soil conditions of the experimental site

95 A composite sample of the surface soil (0–30 cm) was taken and treated for physical and  
96 chemical analyses. Soil at the site had clay loam texture, very slightly alkaline pH and high  
97 content of organic matter (Table 1). These results are consistent with prior use of the plot as a  
98 fruit orchard during the previous 50 years, involving regular organic soil amendment with cow  
99 manure and incorporation of trees' foliage on the ground.

100 ((Table 1:))

101 Extractable nutrient levels were as follows: Inorganic N availability was low, very high for P,  
102 medium for K, high for Ca, moderately high for Mg, moderately low for Fe, very high for Cu,



1  
2  
3 103 excessive for Zn, moderately low for Mn, and medium for B (Table 1). High availability for Ca is  
4  
5 104 certainly associated with the calcareous origin of the soil. Soil is classified as Luvic Castañozem  
6  
7  
8 105 (according to the FAO soil classification system, modified by the CETENAL (1972)).  
9

## 106 **2.2 Boundary–line approach standards**

107 Boundary–line approach standards were developed taking into account data acquired from the  
108 field experiment. Data corresponds to an original database (n = 360) of cladode fresh matter as  
109 yield and the concentration of N, P, K, Ca, and Mg in one–year old cladodes of *O. ficus–indica* L.  
110 Yield data were gathered from one–year cladodes harvested from plants having the same  
111 structure through formation–pruning practice. Each tree structure consisted of three cladodes on  
112 the mother cladode, and three cladodes on each of these three. It means harvested cladodes used  
113 for fresh matter estimation as yield were mainly growing on nine cladodes at the second level  
114 from the mother cladode (Magallanes–Quintanar *et al.*, 2004). One–year cladodes from each of  
115 the 36 experimental plants (one from each experimental unit) were cut from February to March  
116 each year from 2001 to 2007; then weighed to obtain fresh matter as yield.

117 From each plant, a cladode was selected for chemical analyses. Duplicated samples for 2002 to  
118 2004 were considered in order to have an overall sample of 360 cladodes. Those cladodes were  
119 cleaned with distilled water, and dehydrated to constant dry weight in an oven at 75°C during 36  
120 hours, and then milled. Later, nutrient concentrations (under dry weight basis) were estimated  
121 through conventional approaches after acid digestion of the dry tissue samples (Magallanes–  
122 Quintanar *et al.*, 2004; Blanco–Macías *et al.*, 2006): N by Kjeldahl technique, P by reduction  
123 with molybdo–vanadate, and K, Ca, and Mg by spectrophotometric techniques.

124 Table 2 summarizes statistics of the database (n = 360). Yield showed high variability measured  
125 by the coefficient of variation of 44.3%. Also, high variability in concentration of N, Ca and Mg

1  
2  
3 126 (coefficient of variation of 46.5, 36.5 and 27.6%, respectively) was clearly evident; whereas  
4  
5 127 variability for K and P could be considered as moderately high with coefficient of variation  
6  
7  
8 128 values of 22.4 and 21.0%, respectively. Variability is an important aspect when developing  
9  
10 129 nutrient norms. Yield and nutrient concentrations can be considered as plant responses to biotic  
11  
12 130 and abiotic factors, especially those associated with changes in year-to-year climatic conditions  
13  
14  
15 131 and to different fertilization treatments. Thus, this database can be used to develop representative  
16  
17 132 local or regional standards, because of the relative high yield and nutrient concentrations  
18  
19  
20 133 variability.

21  
22 134 ((Table 2:))

23  
24 135 The principle of the BLA was first described by Webb (1972). It was originally employed to  
25  
26 136 determine nutrient critical values or nutrient balances in plant diagnostic models (Møller-Nielsen  
27  
28 137 and Frijs-Nielsen, 1976; Fraser and Eaton, 1983; Walworth *et al.*, 1986). Later, BLA was applied  
29  
30 138 to describe the relationship between soil nutrient concentrations and yields (Evanylo and Sumner,  
31  
32 139 1987; Evanylo, 1990).

33  
34 140 The boundary-line is formed when all values for two variables are plotted and a line enclosing  
35  
36 141 these points is established (Michael *et al.*, 1985). The line represents the limiting effect of the  
37  
38 142 independent variable on the dependent variable (Webb, 1972; Lark, 1997), and thus it is assumed  
39  
40 143 that all values below it result from the influence of another independent variable or a combination  
41  
42 144 of variables that are limiting the dependent variable (Webb, 1972; Hinckley *et al.*, 1978).

43  
44 145 There are several approaches to select the points to define the boundary-line. Taking into account  
45  
46 146 the database for *O. ficus-indica* L., the boundary-line for each nutrient (N, P, K, Ca, and Mg)  
47  
48 147 was estimated when used as the independent variable vs. yield as the response. Concentration  
49  
50 148 values of N, P, Ca and Mg were not normally distributed, and thus transformed to natural  
51  
52 149 logarithm (ln). Then, boundary-lines were computed according to the following procedure:  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

- 1  
2  
3 150 i. The first step consisted of plotting data of cladode nutrient concentration ( $\text{g kg}^{-1}$ ) vs.  
4  
5 151 cladode fresh matter ( $\text{kg plant}^{-1}$ ). Then, each bivariate relation was used in order to  
6  
7 152 analyze the distribution pattern, to determine its suitability and potential use, and to  
8  
9 153 remove obvious outliers. Observations positioned within tails defined by  $\alpha=0.025$  in each  
10  
11 154 distribution were considered as outliers. Therefore, each bivariate distribution had its  
12  
13 155 corresponding sample size ( $n$ ). As a result,  $n=328$  for N vs. yield,  $n=332$  for P vs. yield,  
14  
15 156  $n=327$  for K vs. yield,  $n=318$  for Ca vs. yield, and  $n=325$  for Mg vs. yield.  
16  
17  
18  
19  
20 157 ii. The second step was the selection of the points located on the upper limit of the scatter  
21  
22 158 diagram. It was performed by dividing the nutrient concentration range (independent  
23  
24 159 variable) into classes by using the OpenStat software (Miller, 2008) and selecting only the  
25  
26 160 highest yield point for each interval. The rationale for taking into account representative  
27  
28 161 points of classes was based on two criteria:  
29  
30  
31 162 a). to use at least six representative observations to develop the model in order to limit the  
32  
33 163 selection of points to the superior boundary of the scatter of points, and  
34  
35  
36 164 b). to maximize the likelihood of developing statistically significant models by increasing  
37  
38 165 the number of observations ( $>6$ ).  
39  
40  
41 166 The choice of a number of boundary points which are used to estimate a boundary–line in  
42  
43 167 each scatter diagram represents a compromise between the two aims of big group sizes  
44  
45 168 and a high number of boundary points (Schmidt *et al.*, 2000). These conditions are  
46  
47 169 prerequisites for a reliable definition of boundary points and estimation of boundary–  
48  
49 170 lines, respectively. As a result, at least six points were considered by taking into account  
50  
51 171 the distribution of all points in each scatter diagram. For instance, Figure 1b shows the  
52  
53 172 nine representative observations relating N concentration and *O. ficus–indica* L. yield.  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

1  
2  
3 173 iii. The third step consisted of fitting a second degree polynomial function, as in Figure 1c for  
4  
5 174 the N concentration vs. yield case. When the boundary–line approximates a triangular  
6  
7  
8 175 shape, a set of two linear functions could be used (Walworth *et al.*, 1986; Evanylo and  
9  
10 176 Sumner, 1987; Righetti *et al.*, 1990). The maximum nutrient concentration is estimated by  
11  
12 177 calculating the value corresponding to a slope of zero for the second–degree polynomial  
13  
14 178 regression (see Figures 1b, 1c and 1d for N concentrations). When a triangular shape  
15  
16  
17 179 appears, the maximum concentration could be estimated by choosing the intersection  
18  
19  
20 180 between two straight lines. In the present experiment, nutrient concentrations  
21  
22 181 corresponding to 95% of maximum yield were estimated by solving each of the second–  
23  
24 182 degree polynomial regressions. So, nutrient sufficiency ranges were assessed as shown for  
25  
26  
27 183 the N case in Figure 1d.

28  
29 184 ((Figure 1))  
30  
31

### 32 185 **3 Results**

#### 33 186 **3.1 Boundary–line approach standards**

34  
35  
36  
37 187 In each of the scatter diagrams most of the data points are grouped at the bottom, i.e. at a low  
38  
39  
40 188 yield level (Figures 1a and 2a, 2b, 2c and 2d). High–yields were only rarely measured across each  
41  
42  
43 189 interval considered, thus selection of representative points was easy. So, we were able to choose  
44  
45  
46  
47 190 points at the upper edge of each data body using the procedure described above.

48  
49 191 ((Figure 2:))  
50  
51

52 192 Each of the nutrients *versus* yield diagrams showed a boundary–line model. The original data  
53  
54 193 base (n=360) allowed the successful application of the BLA to assess nutrient standards through  
55  
56  
57 194 fitting significant ( $p < 0.01$ ) second–degree polynomial functions for N, P, K, Ca and Mg (Table  
58  
59  
60

1  
2  
3 195 3) using different numbers of points at the upper edge. The boundary–line fitted by a second–  
4  
5 196 degree function was observed for N, P, K, Ca and Mg with 9 out of 328, 6 out of 332, 14 out of  
6  
7 197 327, 14 out of 318, and 11 out of 325 points, as evidenced in Figure 1 for N and Figure 2 for P,  
8  
9 198 K, Ca and Mg, respectively. Models for all these five nutrients had high  $R^2$  values ( $R^2 > 0.7$ ). In  
10  
11 199 addition, it appears that scatter point distributions with a large spread of nutrient concentrations  
12  
13 200 required a large number of points to optimize the yield of the BLA.  
14

15  
16  
17 201 ((Table 3:))  
18

19  
20 202 The estimated BLA maximum scores are as follows: N = 13.1 g kg<sup>-1</sup>, P = 3.2 g kg<sup>-1</sup>, K = 44.4 g  
21  
22 203 kg<sup>-1</sup>, Ca = 38.1 g kg<sup>-1</sup>, and Mg = 17.3 g kg<sup>-1</sup> (Table 4). On the other hand, sufficiency ranges at  
23  
24 204 95% yield are 8.4 – 20.3 g kg<sup>-1</sup> for N, 2.4 – 4.2 g kg<sup>-1</sup> for P, 38.2 – 50.8 for g kg<sup>-1</sup> for K, 31.8 –  
25  
26 205 45.2 g kg<sup>-1</sup> for Ca, and 14.3 – 20.9 g kg<sup>-1</sup> for Mg (Table 4, Figures 1d, 2a,2b,2c and 2d).  
27  
28

29 206 ((Table 4:))  
30  
31

## 32 33 207 **4 Discussion**

### 34 35 36 37 208 **4.1 Boundary–line approach standards**

38  
39  
40 209 According to the maximum nutrient concentrations in one–year old cladodes of *O. ficus–indica*  
41  
42 210 L. (Table 4), the order of nutrient requirement is as follows: K > Ca > Mg > N > P (that is 44.4 >  
43  
44 211 38.1 > 17.3 > 13.1 > 3.2 g kg<sup>-1</sup>). Results from Table 4 indicate that K/N and Ca/N ratios were of  
45  
46 212 3.4 and 2.9, respectively; suggesting plants tend to concentrate much more K and Ca than N in  
47  
48 213 their one–year old cladodes, proving that they are calcitrophic organisms (Lüttge, 2004).  
49  
50 214 Potassium is the nutrient with the highest concentration in the fruits of *O. ficus–indica* L. plants  
51  
52 215 for fruit (cactus pear) production (Galizzi *et al.*, 2004); thus, it supports the high concentration in  
53  
54 216 one–year old cladodes.  
55  
56  
57  
58  
59  
60

1  
2  
3 217 In addition, previous reports have pointed out the following Ca/N ratio values: 4.5 (Magallanes–  
4  
5 218 Quintanar *et al.*, 2004), 3.95 (Galizzi *et al.*, 2004) and 3.84 (Blanco–Macías *et al.*, 2006). All  
6  
7  
8 219 these values are higher than those associated with estimated BLA standards (Ca/N = 2.9). Indeed,  
9  
10 220 cultivated *O. ficus–indica* L. plants tend to accumulate more Ca in their cladodes in comparison  
11  
12 221 with most of the cultivated species (Magallanes–Quintanar *et al.*, 2004).  
13  
14  
15 222 Magnesium was more than five times higher in concentration than N (Table 4). Previously,  
16  
17 223 Magallanes–Quintanar *et al.* (2004) and Blanco–Macías *et al.* (2006) reported Mg/N ratio of 4.7.  
18  
19 224 Nerd and Mizrahi (1992) pointed out N concentrations from 7.5 to 9.6 g kg<sup>-1</sup> induce high fruit  
20  
21 225 yields of *O. ficus–indica* L. However, the BLA maximum concentration for N (13.1 g kg<sup>-1</sup>, Table  
22  
23 226 3) was higher than these concentrations. It could be associated with the difference of production  
24  
25 227 purpose in both experiments, cladodes *versus* fruit. Thus, our results clearly confirm increase of  
26  
27 228 N in the cladodes induces vegetative growth as pointed out by Nerd and Mizrahi (1992).  
28  
29  
30  
31

## 32 229 **4.2 Comparison between BLA standards and CND norms**

33  
34  
35  
36 230 The BLA maximum N, K, and Mg standards were slightly greater than those obtained with CND  
37  
38 231 (13.1>12.9, 44.4>42.4, and 17.3>16.1 g kg<sup>-1</sup>, respectively) by Blanco–Macías *et al.* (2006). On  
39  
40 232 the other hand, the BLA maximum P and Ca concentrations were slightly lower than those  
41  
42 233 obtained with CND (3.2<3.6 and 38.1<49.6 g kg<sup>-1</sup>, respectively) by Blanco–Macías *et al.* (2006).  
43  
44  
45 234 It deserves to be mentioned that maximum (100%) yields associated with all five BLA maximum  
46  
47 235 nutrient standards (Table 4) were higher (>24%) than target yield (46.7 kg plant<sup>-1</sup>) used for  
48  
49 236 dividing the whole database and to develop CND norms by Blanco–Macías *et al.* (2006). This  
50  
51 237 result suggests that estimated BLA maximum nutrient concentrations at maximum yield (Table 3)  
52  
53 238 could be reliable, and ensures *O. ficus–indica* L. yields higher than the CND target yield of 46.7  
54  
55 239 kg plant<sup>-1</sup>.  
56  
57  
58  
59  
60

1  
2  
3 240 Regarding sufficiency ranges in the case of N, the BLA range (8.4 – 20.3 g kg<sup>-1</sup>) is slightly wider  
4  
5 241 than the CND range (8.2 – 17.6 g kg<sup>-1</sup>) and most of the later is included inside the BLA range.  
6  
7 242 The BLA sufficiency range for P (2.4 – 4.2 g kg<sup>-1</sup>) was also slightly wider than the corresponding  
8  
9 243 CND range (2.8 – 4.4 g kg<sup>-1</sup>), as it was for Mg.

10  
11 244 In the case of K, the BLA sufficiency range (38.2 – 50.8 g kg<sup>-1</sup>) was narrower than the  
12  
13 245 corresponding CND range (33.6 – 51.2 g kg<sup>-1</sup>). Similarly, the BLA sufficiency range (31.8 – 45.2  
14  
15 246 g kg<sup>-1</sup>) for Ca was narrower than the corresponding CND range (32.3 – 66.9 g kg<sup>-1</sup>); and the  
16  
17 247 latter covers entirely the BLA sufficiency range. Such results suggest that BLA norms could be  
18  
19 248 more sensitive than CND reference values for diagnosis of K and Ca status, which is important  
20  
21 249 because *O. ficus-indica* is calcitrophic (Lüttge, 2004; Blanco–Macías *et al.*, 2006).

22  
23 250 In general, all these results suggest lower and upper concentrations of the BLA sufficiency  
24  
25 251 nutrient ranges at 95% of maximum yield could be reliable. Nutrient standards derived from BLA  
26  
27 252 for *O. ficus-indica* L. are comparable to those already estimated through the CND technique by  
28  
29 253 Blanco–Macías *et al.* (2006). Use of this strategy agrees with results from Vizcaíno–Soto and  
30  
31 254 Côté (2004), who found that BLA yielded nutrient standards for sugar maple (*Acer saccharum*  
32  
33 255 Marsh.) are comparable to those already computed by the CND technique.

34  
35 256 It was necessary to transform variables (nutrients) that were not normally distributed in order to  
36  
37 257 estimate BLA standards. Certainly, this process provides reliable results. For instance, all five  
38  
39 258 BLA maximum nutrient concentrations were associated with higher yields than CND means, so  
40  
41 259 they are expected to be more sensitive when making nutritional diagnosis in order to correct  
42  
43 260 nutritional disorders. On the other hand, lower and upper concentrations of the BLA sufficiency  
44  
45 261 nutrient ranges were comparable to ranges developed through CND approach. Our results  
46  
47 262 confirm that both techniques are more complementary than mutually exclusive. However, we  
48  
49 263 recommend use of proposed BLA standards and CND norms with caution, because norms  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

1  
2  
3 264 developed under one set of conditions should only be applied to another if the nutrient  
4  
5 265 concentrations of high-yielding plants from these different set of conditions are similar (dos  
6  
7  
8 266 Anjos Reis, 2002; dos Anjos Reis and Monnerat, 2002).

9  
10 267 Nutrients such as Fe, Cu, Zn, Mn, and B were not considered in this study because CND  
11  
12 268 standards have not been developed for *O. ficus-indica* L. However, they should be taken into  
13  
14  
15 269 account in future research, particularly in the present case where Fe and Mn levels (Table 1)  
16  
17 270 suggest their concentrations could be deficient in the one-year old cladodes.

18  
19  
20 271

## 21 22 272 5 Conclusions

23  
24  
25 273 The boundary-line fitted by a second-degree function was developed for N, P, K, Ca and Mg.  
26  
27 274 Optimum boundary-line approach scores for *O. ficus-indica* L. were as follows: N = 13.1 g kg<sup>-1</sup>,  
28  
29 275 P = 3.2 g kg<sup>-1</sup>, K = 44.4 g kg<sup>-1</sup>, Ca = 38.1 g kg<sup>-1</sup>, and Mg = 17.3 g kg<sup>-1</sup>; whereas sufficiency  
30  
31  
32 276 ranges at 95% yield were 8.4 – 20.3 g kg<sup>-1</sup> for N, 2.4 – 4.2 g kg<sup>-1</sup> for P, 38.2 – 50.8 g kg<sup>-1</sup> for K,  
33  
34 277 31.8 – 45.2 g kg<sup>-1</sup> for Ca, and 14.3 – 20.9 g kg<sup>-1</sup> for Mg.

35  
36  
37 278 Boundary-line approach estimated standards for *O. ficus-indica* L. could be reliable and lower  
38  
39 279 and upper concentrations of the BLA sufficiency nutrient ranges were comparable to norms  
40  
41 280 developed through CND approach. However, readers must take into account these results are  
42  
43  
44 281 probably valid only at local and regional levels; that is, they relate to *O. ficus-indica* L. plants  
45  
46 282 growing under a Luvic Castañozem and calcareous soil, and a BS1bw(w) climate conditions, and  
47  
48 283 to high-yielding plants similar to those presented in this report.

49  
50  
51 284 We recommend use of proposed standards if the nutrient concentrations of high-yielding plants  
52  
53 285 from other sets of conditions are similar to those presented in this report.  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60



## 286 Acknowledgements

287 FBM acknowledge financial support from ‘Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología’ during his  
288 Doctoral studies. This research work was supported in part by the ‘Programa de Investigación en  
289 Fruticultura, Universidad Autónoma Chapingo’ under contract PUI-FRU 10230308. The authors  
290 wish to thank the anonymous reviewers for their valuable assistance.

## 291 References

- 292 *Aitchison, J.* (1986): Statistical Analysis of Compositional Data. Chapman and Hall, New York.
- 293 *Bates, T.E.* (1971): Factors affecting critical nutrient concentrations in plant and their evaluation:  
294 A review. *Soil Sci.* 112, 116–130.
- 295 *Blanco–Macías, F., Lara–Herrera, A., Valdez–Cepeda, R.D., Cortés–Bañuelos, J.O., Luna–*  
296 *Flores, M., Salas–Luévano, M.A.* (2006): Interacciones nutrimentales y normas de la  
297 técnica de nutrimento compuesto en nopal (*Opuntia ficus–indica* L. Miller). *Rev. Chapingo,*  
298 *Serie Horticultura* 12(2), 165–175.
- 299 *Cakmak, I.* (2000): Role of zinc in protecting plant cells from reactive oxygen species. *New*  
300 *Phytol.* 146, 185–205.
- 301 *CETENAL (Comisión de Estudios del Territorio Nacional).* (1972): Carta Edafológica.  
302 CETENAL, México.
- 303 *dos Anjos Reis, R.* (2002): DRIS norms universality in the corn crop. *Comm. Soil Sci. Plant Nutr.*  
304 33(5 & 6), 711–735.
- 305 *dos Anjos Reis, R., Monnerat, P.H.* (2002): Sugarcane nutritional diagnosis with DRIS norms  
306 established in Brazil, South Africa and the United States. *J. Plant Nutr.* 25(12), 2831–2851.
- 307 *Dow, A.I., Roberts, S.* (1982): Proposal: Critical nutrient ranges for crop diagnosis. *Agron. J.* 74,  
308 401–403.

- 1  
2  
3 309 *Evanylo, G.K., Sumner, M.E. (1987): Utilization of the boundary line approach in the*  
4  
5 310 *development of soil nutrient norms for soybean production. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 18,*  
6  
7 311 *1379–1401.*  
8  
9  
10 312 *Evanylo, G.K. (1990): Soil and plant calibration for cucumbers grown in the mid–Atlantic coastal*  
11  
12 313 *plain. Comm. Soil Sci. Plant Anal. 21, 251–272.*  
13  
14  
15 314 *Fraser, J., Eaton, G.W. (1983): Applications of yield component analysis to crop research. Field*  
16  
17 315 *Crops Abs. 36, 787–797.*  
18  
19  
20 316 *Galizzi, F.A., Felker, P., González, C., Gardiner, D. (2004): Correlations between soil and*  
21  
22 317 *cladode nutrient concentrations and fruit yield and quality in cactus pears, *Opuntia ficus–**  
23  
24 318 *indica, in a traditional farm setting in Argentina. J. Arid Environ. 59, 115–132.*  
25  
26  
27 319 *García–Hernández, J.L., Valdez–Cepeda, R.D., Murillo–Amador, B., Nieto–Garibay, A.,*  
28  
29 320 *Beltrán–Morales, L.F., Magallanes–Quintanar, R., Troyo–Diéguez, E. (2004):*  
30  
31 321 *Compositional nutrient diagnosis and main nutrient interactions in yellow pepper grown on*  
32  
33 322 *desert calcareous soils. J. Plant Nutr. and Soil Sci. 167, 509–515.*  
34  
35  
36 323 *García–Hernández, J.L., Valdez–Cepeda, R.D., Ávila–Serrano, N.Y., Murillo–Amador, B.,*  
37  
38 324 *Nieto–Garibay, A., Magallanes–Quintanar, R., Larrinaga–Mayoral, J., Troyo–Diéguez, E.*  
39  
40 325 *(2005): Preliminary compositional nutrient diagnosis norms for cowpea (*Vigna unguiculata**  
41  
42 326 *(L.) Walp.) grown on desert calcareous soil. Plant and Soil 271 (1–2), 297–307.*  
43  
44  
45 327 *Hinckley, T.M., Aslin, R.G. Aubuchon, R.R., Metcalf, C.L., Roberts, J.E. (1978): Leaf*  
46  
47 328 *conductance and photosynthesis in four species of the oak–hickory forest type. Forest Sci.*  
48  
49 329 *24, 73–84.*  
50  
51  
52  
53 330 *Khiari, L., Parent, L.E., Tremblay, N. (2001a): Selecting the high–yield subpopulation for*  
54  
55 331 *diagnosing nutrient imbalance in crops. Agron. J. 93(4), 802–808.*  
56  
57  
58  
59  
60

- 1  
2  
3 332 *Khiari, L., Parent, L.E., Tremblay, N. (2001b): The phosphorus composition nutrient diagnosis*  
4  
5  
6 333 *range for potato. Agron. J. 93(4), 815–819.*  
7  
8 334 *Lark, R.M. (1997): An empirical method for describing the joint effects of environmental and*  
9  
10 335 *other variables on crop yield. Ann. Applied Biol. 131, 141–159.*  
11  
12 336 *Loneragan, J.F. (1997): Plant nutrition in the 20th and perspectives for the 21st century. Plant*  
13  
14 337 *and Soil 196, 163–174.*  
15  
16  
17 338 *Lüttge, U. (2004): Ecophysiology of crassulacean acid metabolism (CAM). Ann. Botany 93, 629–*  
18  
19 339 *652.*  
20  
21  
22 340 *Magallanes–Quintanar, R., Valdez–Cepeda, R.D., Blanco–Macías, F., Márquez–Madrid, M.,*  
23  
24 341 *Ruíz–Garduño, R.R., Pérez–Veyna, O., García–Hernández, J.L., Murillo–Amador, B.,*  
25  
26 342 *López–Martínez, J.D., Martínez–Rubín de Celis, E. (2004): Compositional nutrient*  
27  
28 343 *diagnosis in nopal (Opuntia ficus–indica). J. Prof. Assoc. Cactus Develop. 6, 78–89.*  
29  
30  
31 344 *Magallanes–Quintanar, R., Valdez–Cepeda, R.D., Olivares–Sáenz, E., Pérez–Veyna, O., García–*  
32  
33 345 *Hernández, J.L. (2006): Compositional nutrient diagnosis in maize grown in a calcareous*  
34  
35 346 *soil. J. Plant Nutr. 29, 2019–2033.*  
36  
37  
38 347 *Melsted, S.W., Motto, H.L., Peck, T.R. (1969): Critical plant nutrient composition values useful in*  
39  
40 348 *interpreting plant analysis data. Agron. J. 61, 17–20.*  
41  
42  
43 349 *Michael, D.A., Dickman, D.I., Gottschalk, K.W., Nelson, N.D., Isebrands, J.G. (1985):*  
44  
45 350 *Determining photosynthesis of tree leaves in the field using a portable <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> apparatus:*  
46  
47 351 *procedures and problems. Photosynthetica 19, 98–108.*  
48  
49  
50 352 *Miller, W.A. (2008): OpenStat: A Free Statistics Package for Instruction and Analyses. E–mail:*  
51  
52 353 *openstat@msn.com*  
53  
54  
55 354 *Møller–Nielsen, J., Frijs–Nielsen, B. (1976): Evaluation and control of the nutritional status of*  
56  
57 355 *cereals, II: Pure effect of a nutrient. Plant and Soil 45, 339–351.*  
58  
59  
60

- 1  
2  
3 356 Nerd, A., Mizrahi, Y. (1992): Effects of fertilization on prickly pear production in Israel.  
4  
5  
6 357 Proceedings of the Third Annual Texas Prickly Pear Council. Kingsville, TX, USA. pp. 1–  
7  
8 358 4.  
9  
10 359 Parent, L.E., Dafir, M. (1992): A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. *J. Am.*  
11  
12 360 *Soc. Hort. Sci.* 117, 239–242.  
13  
14  
15 361 Parent, L.E., Karam, A., Visser, S.A. (1993): Compositional nutrient diagnosis of the greenhouse  
16  
17 362 tomato. *HortSci.* 28, 1041–1042.  
18  
19  
20 363 Parent, L.E., Cambouris, A.N., Muhawenimana, A. (1994): Multivariate diagnosis of nutrient  
21  
22 364 imbalance in potato crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 1432–1438.  
23  
24  
25 365 Quesnel, P.O., Côté, B., Fyles, J., Munson, A. (2006): Optimum nutrient concentrations and CND  
26  
27 366 scores of mature white spruce determined using a boundary–line approach and spatial  
28  
29 367 variation of tree growth and nutrition. *J. Plant Nutr.* 29 (11), 1999–2018.  
30  
31  
32 368 Righetti, T.L., Wilder, K.L., Gummings, G.A. (1990): Plant Analysis as an Aid to Fertilizing  
33  
34 369 Orchard Crops. pp. 563–601. In: R.L. Westerman (ed.). *Soil Testing and Plant Analysis.*  
35  
36 370 American Society of Agronomy. Madison, WI, USA.  
37  
38  
39 371 Schmidt, U., Hanspeter, T., Kaupenjohann, M. (2000): Using a boundary–line approach to  
40  
41 372 analyze N<sub>2</sub>O flux data from agricultural soils. *Nutr. Cycl. Agric. Ecosys.* 57, 119–129.  
42  
43  
44 373 Vizcaíno–Soto, G., Côté, B. (2004): Boundary–line approach to determine standards of nutrition  
45  
46 374 for mature trees from spatial variation of growth and foliar nutrient concentrations in  
47  
48 375 natural environments. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 35, 2965–2985.  
49  
50  
51 376 Walworth, J.L., Letzsch, W.S., Sumner, M.E. (1986): Use of boundary lines in establishing  
52  
53 377 diagnostic norms. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50, 123–128.  
54  
55  
56 378 Webb, R.A. (1972): Use of the boundary–line in the analysis of biological data. *J. Hort. Sci.* 47,  
57  
58 379 309–319.  
59  
60

380

381 Table 1: Soil properties of the experimental plot (Blanco–Macías *et al.*, 2006).

Nutrient/Factor	Quantity	Interpretation of nutrient availability or factor condition	Method
pH	7.5	Very slightly Alkaline	pH Meter (Soil:water, 1:2)
Organic Matter (%)	3.2	High	Walkley and Black
N–Inorganic (mg kg <sup>-1</sup> )	15.0	Low	Extracted with KCl 2N, determined by Kjeldahl approach
P (mg kg <sup>-1</sup> )	40.5	Very high	Olsen
K (mg kg <sup>-1</sup> )	230.0	Medium	Extracted using ammonium acetate and determined by spectrophotometry
Ca (mg kg <sup>-1</sup> )	4371.0	High	Extracted using ammonium acetate and determined by spectrophotometry
Mg (mg kg <sup>-1</sup> )	569.0	Moderately high	Extracted using ammonium acetate and determined by spectrophotometry
Fe (mg kg <sup>-1</sup> )	7.9	Moderately low	Extracted with DTPA, ratio 1:4, determined by atomic spectrophotometry
Cu (mg kg <sup>-1</sup> )	7.5	Very high	Extracted with DTPA, ratio 1:4, determined by atomic spectrophotometry
Zn (mg kg <sup>-1</sup> )	14.6	Excessive	Extracted with DTPA, ratio 1:4, determined by atomic spectrophotometry
Mn (mg kg <sup>-1</sup> )	6.1	Moderately low	Extracted with DTPA, ratio 1:4, determined by atomic spectrophotometry
B (mg kg <sup>-1</sup> )	1.6	Medium	Extracted with CaCl <sub>2</sub> 1.0 M, determined by photocolourimetry
Sand (%)	32.2		Bouyoucos hydrometer
Silt (%)	41.6	Clay loam texture	Bouyoucos hydrometer
Clay (%)	26.2		Bouyoucos hydrometer

382

1  
2  
3  
4 383 Table 2: Basic statistics for yield (cladodes fresh matter in kg plant<sup>-1</sup>) and N, P, K, Ca and Mg  
5 384 concentrations (g kg<sup>-1</sup>) in one-year old cladodes of *Opuntia ficus-indica* L. for the whole  
6  
7 385 database (n = 360).  
8

Statistic	Yield	N	P	K	Ca	Mg
Mean	33.1	10.5	3.4	40.5	39.3	15.5
Standard Deviation	14.6	4.9	0.7	9.1	14.4	4.3
Coefficient of Variation	44.3	46.5	21.0	22.4	36.5	27.6
Minimum	6.00	1.8	1.6	13.8	12.2	7.8
Maximum	92.0	26.3	6.3	65.5	82.0	39.5

9  
10  
11  
12  
13  
14  
15  
16  
17  
18  
19  
20  
21  
22 386  
23  
24  
25  
26  
27  
28  
29  
30  
31  
32  
33  
34  
35  
36  
37  
38  
39  
40  
41  
42  
43  
44  
45  
46  
47  
48  
49  
50  
51  
52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60

387 Table 3: Statistics of boundary lines fitted by second-degree functions ( $Y=A+B_1X+B_2X^2$ ).

Nutrient (X)	A	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	r <sup>2</sup>	P-level (Model)
N	-42.1	79.0	-15.4	0.94	<0.001
P-level	0.019	<0.001	0.001		
P	6.3	94.0	-40.4	0.97	0.006
P-level	0.413	0.004	0.003		
K	-93.8	7.00	-0.08	0.73	<0.001
P-level	0.071	<0.001	<0.001		
Ca	-880.0	518.1	-71.3	0.83	<0.001
P-level	<0.001	<0.001	<0.001		
Mg	-602.00	465.7	-81.8	0.79	0.002
P-level	0.006	0.004	0.006		

388

389 Table 4. Compositional Nutrient Diagnosis (CND) nutrient optimum ranges and Boundary–line  
 390 approach (BLA) nutrient maximum concentrations and ranges of sufficiency for *Opuntia ficus–*  
 391 *indica* L.

Nutrient	CND ranges*	Nutrient	BLA Nutrient (100% Yield)	100% Yield (kg plant <sup>-1</sup> )	BLA Sufficiency range (95% Yield)		95% Yield (kg plant <sup>-1</sup> )
					Lower	Higher	
N (g kg <sup>-1</sup> )	12.9±4.7*	N [ln (g kg <sup>-1</sup> )]	2.6 (13.1) <sup>†</sup>	59.4	2.1 (8.4) <sup>†</sup>	3.0 (20.3) <sup>†</sup>	56.4
P (g kg <sup>-1</sup> )	3.6±0.8	P [ln (g kg <sup>-1</sup> )]	1.2 (3.2)	61.0	0.9 (2.4)	1.4 (4.2)	58.0
K (g kg <sup>-1</sup> )	42.4±8.8	K (g kg <sup>-1</sup> )	44.4	62.0	38.2	50.8	58.9
Ca (g kg <sup>-1</sup> )	49.6±17.3	Ca [ln (g kg <sup>-1</sup> )]	3.6 (38.1)	62.1	3.5 (31.8)	3.8 (45.2)	59.9
Mg (g kg <sup>-1</sup> )	16.2±2.7	Mg [ln (g kg <sup>-1</sup> )]	2.9 (17.3)	61.4	2.7 (14.3)	3.0 (20.9)	58.4

\*CND optimum ranges (mean ± standard deviation) with a yield cutoff value of reference of 46.7 Kg plant<sup>-1</sup> (Blanco–Macías *et al.*, 2006).

<sup>†</sup>Retransformed values are in parenthesis.



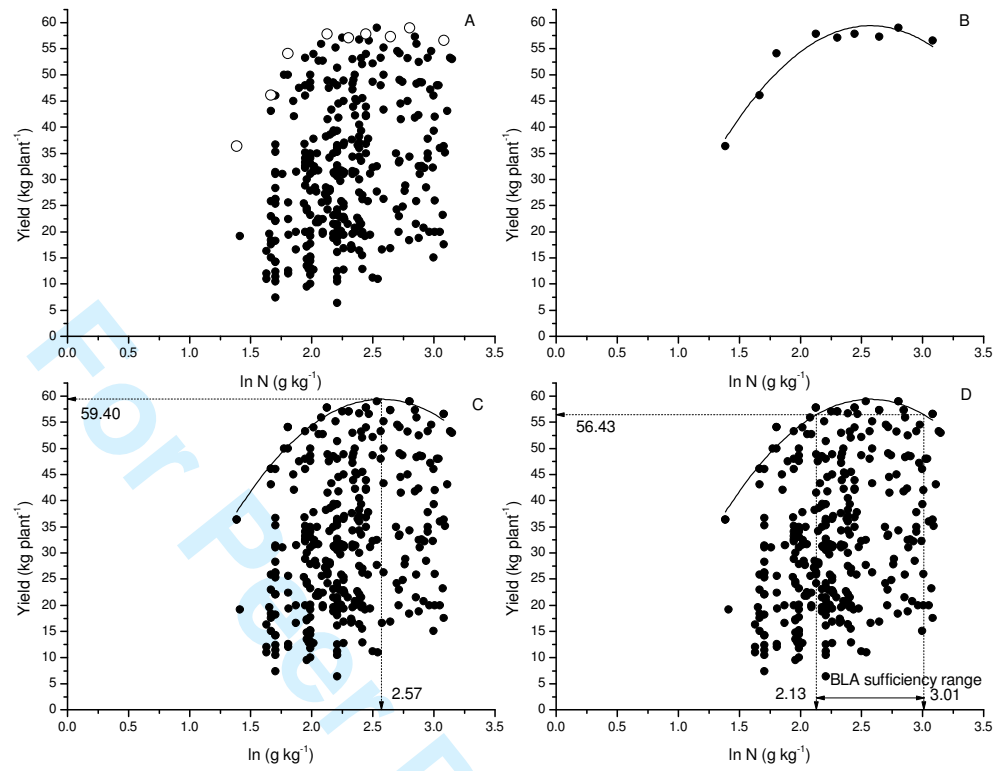


Figure 1:

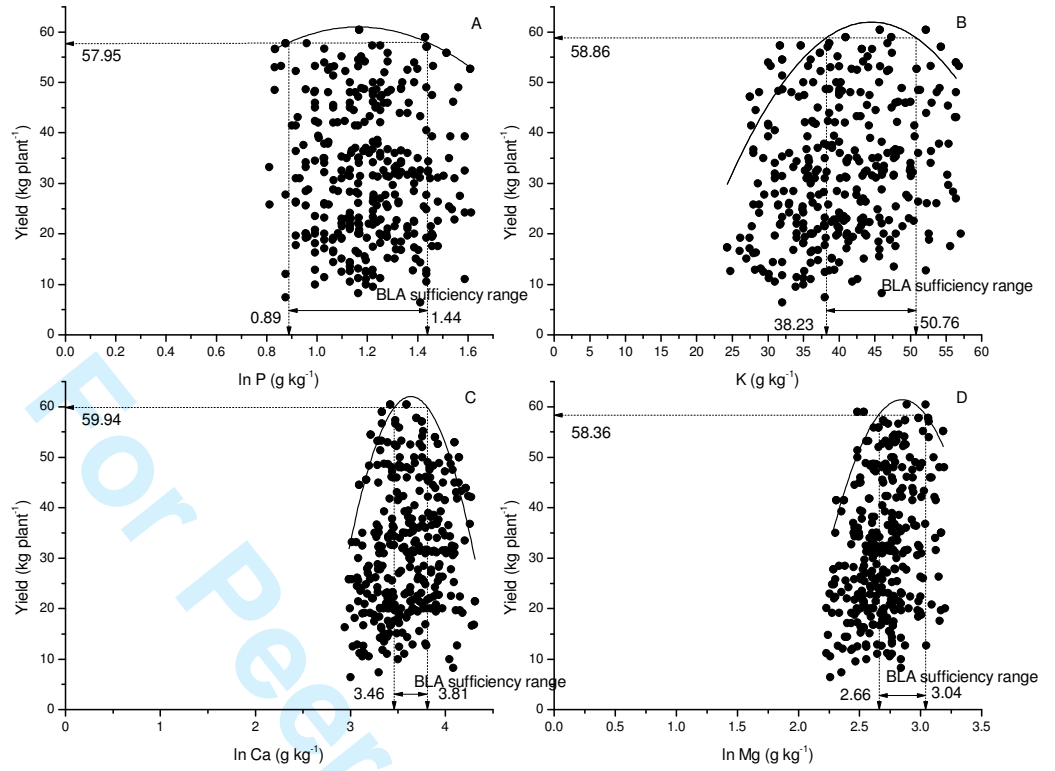


Figure 2:

### Figure legends

Figure 1: The different steps of the boundary–line approach as applied to Nitrogen (N) concentration ( $\text{g kg}^{-1}$ ) and yield ( $\text{kg plant}^{-1}$ ) of *Opuntia ficus–indica* L. Plot without outliers and scatter diagram showing upper points (A). Plot showing only upper points and fitted second degree function (B). Plot showing all points, fitted second degree function (boundary–line), estimated maximum yield, and nutrient optimum concentration (C). Plot showing all points, fitted second degree function (boundary–line), estimated 95% yield, and associated nutrient sufficiency range (D).

Figure 2: The relationship between nutrient concentration ( $\text{g kg}^{-1}$ ) and *Opuntia ficus–indica* L. yield ( $\text{kg plant}^{-1}$ ) showing boundary–line described by a second degree function. Phosphorus (A), Potassium (B), Calcium (C) and Magnesium (D). See Table 3 for fitted polynomial functions.