INTERACCIONES NUTRIMENTALES Y NORMAS DE DIAGNÓSTICO DE NUTRIMENTO COMPUESTO EN UN CULTIVAR SEMIDOMESTICADO DE *Capsicum frutescens*

J. L. García-Hernández[1]; R. D. Valdez-Cepeda[2, 3¶]; R. Servín-Villegas[1]; E. Troyo-Diéguez[1]; B. Murillo-Amador[1]; E. O. Rueda-Puente[4]; J. C. Rodríguez-Ortiz[5]; R. Magallanes-Quintanar[6]

[1]Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., Mar Bermejo Núm. 195, Col. Playa Palo Santa Rita. La Paz, Baja California Sur. C. P. 23090. MÉXICO.
[2]Universidad Autónoma Chapingo. Centro Regional Universitario Centro Norte. Apartado Postal 196, Calle Cruz del Sur Núm. 100, Col. Constelación. El Orito, Zacatecas, Zac. C. P. 98085. MÉXICO.
Correo-e: vacrida@gmail.com (¶Autor responsable).
[3]Universidad Autónoma de Zacatecas. Unidad Académica de Matemáticas. Cuerpo Académico de Sistemas Complejos. Paseo Solidaridad esq. Carretera a La Bufa. Zacatecas, Zac. MÉXICO.
[4]Universidad de Sonora. Campus Santa Ana, Carretera internacional y 16 de septiembre s/n., Santa Ana, Sonora. MÉXICO.
[5]Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Facultad de Agronomía. Km. 14.5 Carretera S.L.P.-Matehuala. Ej. Palma de la Cruz, Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P. MÉXICO.
[6]Universidad Autónoma de Zacatecas. Unidad Académica de Ingeniería, Cuerpo Académico de Sistemas Complejos. Av. Ramón López Velarde Núm. 801. Zacatecas, Zac. C. P. 98001. MÉXICO

RESUMEN

El género *Capsicum* es uno de los grupos taxonómicos vegetales de mayor aprovechamiento en el mundo. Aunque la especie *C. annuum* incluye la mayor cantidad de tipos y variedades de chile, existen otros cultivares de otras especies que se encuentran en proceso de domesticación y mejoramiento. El cultivar caribe o chiltepín de la especie *C. frutescens* está en este proceso debido a sus sobresalientes características físicas y bioquímicas y a su capacidad potencial para tolerar condiciones de sequía y salinidad. Este trabajo fue desarrollado para determinar las normas de diagnóstico de la composición nutrimental (DCN) y para estudiar las interacciones entre nutrientes de dicho cultivar. A través de la metodología de DCN se evaluó el valor mínimo de alto rendimiento de fruto fresco, así como los rangos de macronutrimentos (N, P, K, Ca y Mg) óptimos correspondientes en el tejido foliar, los cuales son llamados normas nutrimentales. Esas normas se definieron considerando un valor de rendimiento mínimo de 7.16 $t \cdot ha^{-1}$. Los análisis de componentes principales, utilizando los índices de DCN, permitieron identificar las siguientes interacciones: positivas N-P y Ca-Mg y negativas N-Ca, N-Mg, P-Ca y P-Mg.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: rendimiento, nutrición vegetal, balance nutrimental, chile.

NUTRIENT INTERACTIONS AND COMPOSITIONAL NUTRIENT DIAGNOSIS NORMS IN A SEMI-DOMESTICATED CULTIVAR OF *Capsicum frutescens*

ABSTRACT

The *Capsicum* genus is one of the most useful plants taxonomic groups throughout the world. Although the species *C. annuum* includes the largest amount of cultivated pepper types and varieties, there are cultivars from other species under domestication process. The caribe or chiltepin cultivar of *C. frutescens* is currently under this process due to its outstanding physical and biochemical characteristics, and its potential ability to withstand drought and saline conditions. This work was developed to calculate

Recibido: 15 de enero, 2007
Aceptado: 18 de junio, 2007

their preliminary compositional nutrient diagnosis (CND) norms and to identify its nutrient interactions. The target yield for fresh fruit production of this cultivar was assessed through the CND approach, as well as the corresponding optimum ranges of macronutrients (N, P, K, Ca, and Mg) foliar content, which are called CND nutrient norms. These norms were defined using a minimum yield of 7.16 $t \cdot ha^{-1}$. The statistical principal component analyses, performed using estimated CND nutrient indexes, allowed us to identify the following nutrient interactions: positive N-P and Ca-Mg, and negative N-Ca, N-Mg, P-Ca, and P-Mg.

ADDITIONAL KEY WORDS: yield, plant nutrition, nutrient balance, pepper.

INTRODUCCIÓN

El género *Capsicum* (Solanaceae) incluye al menos 30 especies y una muy amplia diversidad de variedades y cultivares (Hernández *et al*., 2001). La gran mayoría de cultivares mejorados pertenecen a la especie *C. annuum*; sin embargo, algunos cultivares de otras especies están siendo aprovechados a menudo en condiciones silvestres o semidomesticadas. Tal es el caso del cultivar caribe o chiltepín de la especie semiperenne *C. frutescens*, mismo que es sumamente apreciado en la región noroeste de México debido a su sabor muy picante y cualidades sobresalientes para la industria del chile en polvo. El metabolismo de este tipo de plantas produce, tanto en frutos como en hojas, una importante cantidad de compuestos únicos de valor nutrimental o industrial, tales como los alcaloides capsaicina, capsantina, y capsorubina. Considerando que las deficiencias nutrimentales son factores limitantes, el entendimiento de los mecanismos que contribuyen a la absorción, transporte, síntesis y acumulación de los nutrimentos en diversos ambientes, es esencial para mejorar el valor nutricional de las plantas de chile (Marschner, 1986).

En este contexto, ya se han publicado las normas de diagnóstico de nutrimento compuesto para dos variedades comerciales de chile *C. annuum*, de los tipos "güero" (García *et al*., 2004) y "mirasol" (Valdez *et al*., 2005). Los métodos de DNC y análisis de componentes principales han sido consideradas como técnicas apropiadas para diagnosticar el estado nutrimental e identificar interacciones nutrimentales en papa (Khiari *et al*., 2001), chile (García *et al*., 2004; Valdez *et al*., 2005), nopal (Magallanes *et al*., 2005; Blanco *et al*., 2006), frijol cowpea (García *et al*., 2005), sábila (García *et al*., 2006) y maíz (Magallanes *et al*., 2006).

El método de DNC se fundamenta en una sólida base matemática para definir el valor de rendimiento crítico apropiado para discriminar entre sub-poblaciones de alto y bajo rendimiento (Parent y Dafir, 1992). Esto se logra al considerar el punto de inflexión en la relación cúbica entre el rendimiento y cada una de las funciones de proporción de varianza acumulada (Parent y Dafir, 1992). También, esta técnica contempla la estimación de índices para cada nutrimento, al involucrar en su cálculo la proporción entre cada uno de los nutrimentos y los demás, incluyendo un nutrimento de relleno (R) que sustituye a los nutrimentos no cuantificados en la muestra foliar y la media geométrica (G). Esas son algunas de las ventajas del método de DNC con respecto a otras técnicas de diagnóstico como el Sistema Integrado de Diagnóstico-Recomendación (DRIS) y la de valor crítico, entre otras.

Los objetivos de este estudio fueron: 1) calcular las normas preliminares de DNC en el cultivar chiltepín de la especie *C. frutescens* que se cultivó en un suelo de tipo desértico calcáreo en La Paz, B.C.S., México; y 2) identificar interacciones significativas entre los nutrimentos a través del análisis de componentes principales tomando en consideración los índices de DNC.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo está basado en datos obtenidos en el Campo Experimental del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, en La Paz, B.C.S, ubicado en la porción meridional de la Península de Baja California, se localiza entre los 19 y 31° N. El clima está clasificado como Bw (h')hw (e). La temperatura media anual oscila entre 22 y 23 °C, y la precipitación media anual varía entre 100 y 250 mm, mientras que la evaporación media anual va de 1,758 a 2,472 mm.

El suelo experimental se clasifica como Yermosol háplico con un contenido promedio de materia orgánica <0.4 % y con más del 75 % de arena. Antes de la siembra se tomaron 10 muestras del suelo de la capa arable (0-30 cm) y se realizaron análisis para determinar el contenido de macronutrimentos de la siguiente forma: N total con el método de Kjeldahl, P con el método de Olsen, Ca y Mg con el método volumétrico (Cheng y Bray, 1951) y K extraíble con el método de Peech (Knudsen *et al*., 1982). El pH fue analizado en solución 1:2 (agua deionizada:suelo) con potenciómetro, la conductividad eléctrica (CE) usando un conductivímetro, y el contenido de $CaCO_3$ usando el método ácido (USSL, 1954). Los valores obtenidos en los respectivos análisis fueron los siguientes (media ± desviación estándar): 3.55±0.59 mg $N \cdot kg^{-1}$, 38.41±23.25 mg $P \cdot kg^{-1}$, 162.15±34.9 mg $K \cdot kg^{-1}$, 25.3±6.93 mg $Ca \cdot kg^{-1}$, 10.38±3.78 mg $Mg \cdot kg^{-1}$, pH=7.82±0.55, 1.99±0.95 $dS \cdot m^{-1}$ de CE, y 21±12 $g \cdot kg^{-1}$ de $CaCO_3$. De acuerdo a tales características, el suelo experimental puede ser clasificado como suelo desértico, caracterizado por un horizonte A estrecho con muy bajo contenido de materia orgánica, calcáreo y con alta susceptibilidad a la acumulación de sales solubles.

La siembra se realizó con una distancia entre surcos de 80 cm y entre plantas de 40 cm para una densidad de población de 31,250 plantas$\cdot ha^{-1}$. Se instaló un sistema de

riego por goteo para suministrar 3 mm de agua diariamente. Los tratamientos de herbicidas, fungicidas e insecticidas fueron aplicados de acuerdo a las prácticas estándar para mantener las plagas por debajo de los umbrales económicos.

El suelo fue fertilizado con 120, 26.22, 24.9 y 30 kg·ha^{-1} de N, P, K y S, respectivamente.

Durante la etapa de floración se colectaron 50 muestras foliares tomadas de plantas visiblemente sanas distribuidas al azar en el lote experimental. Cada muestra fue limpiada con agua destilada y deshidratada hasta peso constante. Posteriormente, cada muestra fue analizada para determinar los contenidos de N, P, K, Ca y Mg. El N fue logrado por el método de Kjeldahl. El K, Ca y Mg fueron obtenidos usando un espectrofotómetro de absorción atómica (Shimadzu AA-660, Kyoto, Japón) después de la digestión con una mezcla de H_2SO_4, HNO_3 y $HClO_4$. El P fue analizado colorimétricamente a través del método azul complejo fosfo-molibdato. Las plantas que fueron usadas para colectar las muestras foliares se usaron para estimar el rendimiento considerando la producción de fruto fresco en cinco fechas distribuidas en nueve meses durante el primer año de producción. Posteriormente, cada observación de rendimiento fue relacionada con las concentraciones de nutrimentos correspondientes en la base de datos.

Las normas de DNC fueron determinadas de acuerdo al procedimiento teórico-matemático descrito en primera instancia en Khiari *et al*. (2001) y, posteriormente, en García *et al*. (2004; 2005; 2006), Magallanes *et al.* (2005; 2006) y Blanco *et al.* (2006) usando el programa Excel 2000 (Microsoft Corp., 2000), tal y como se describe brevemente enseguida.

Las concentraciones de los nutrimentos fueron transformadas a proporciones invariantes (centradas) al dividirlas por la media geométrica. Posteriormente, se determinaron los logaritmos de las proporciones centradas: V_N, V_P, V_K, V_{Ca}, V_{Mg} y V_{R_d}.

A su vez, esos valores fueron usados para calcular las proporciones de varianza [$f_i(V_X)$] entre grupos de observaciones asociadas a altos y bajos rendimientos considerando el procedimiento de Cate-Nelson: primeramente las dos observaciones con mayor rendimiento conformaron el grupo de alto rendimiento y el resto de observaciones el grupo de bajo rendimiento; en la siguiente iteración, el grupo de alto rendimiento se conformó por tres observaciones, mientras que el de bajo rendimiento por una observación menos que el grupo de bajo rendimiento asociado a la iteración inicial; y así sucesivamente.

Después, el valor de la función de proporción de varianza acumulada [$F_i^C(V_X)$] se estimó, para cada iteración, como la suma de las proporciones de varianza. La función de proporción de varianza acumulada se calcula al considerar la proporción entre la sumatoria de las proporciones de varianza en cada iteración y la sumatoria de las proporciones de varianza de todas las iteraciones (constante), de donde resulta una función cúbica útil para comparar la fuerza discriminatoria de los logaritmos de las proporciones centradas (V_X) entre los grupos de alto y bajo rendimiento, sobre una escala común.

Los puntos de inflexión para diferenciar entre las sub-poblaciones de altos y bajos rendimientos fueron determinados después de examinar las seis funciones cúbicas ajustadas al considerar las relaciones entre cada función de varianza acumulada [$F_i^C(V_N)$, $F_i^C(V_P)$, …, $F_i^C(V_R)$] y el rendimiento.

Para identificar interacciones importantes se realizaron análisis de componentes principales; y para definir las interacciones que discriminan significativamente a la sub-población de alto de la de bajo rendimiento, se realizaron pruebas de *t* y *F* con el programa Statistica Versión 6 (StatSoft Inc., 2004).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los estimadores estadísticos descriptivos de la variable rendimiento presentaron los siguientes valores: media = 6.99 t·ha^{-1}, mínimo = 3.27 t·ha^{-1}, máximo = 12.58 t·ha^{-1} y desviación estándar = 2.41 t·ha^{-1}.

Normas de diagnóstico de nutrimento compuesto

Las seis funciones cúbicas experimentales, entre cada función de varianza acumulada [$F_i^C(V_N)$, $F_i^C(V_P)$, …, $F_i^C(V_R)$] y el rendimiento, se aprecian en la Figura 1. Todas las funciones se ajustaron a un patrón cúbico (Cuadro 1). Los valores de rendimiento asociados a los puntos de inflexión fueron 7.16, 7.06, 5.95, 0.11, 0.11 y 6.81 t·ha^{-1} para N, P, K, Ca, Mg y R, respectivamente (Cuadro 1). Puesto que los índices globales de desbalance nutrimental (DNC r^2) se ajustan a una distribución χ^2 (Magallanes *et al*., 2006), la teoría del método de DNC recomienda tomar el valor de rendimiento más alto para ser usado en la partición de las observaciones en subpoblaciones de alto y bajo rendimiento, como el rendimiento con el que se estima el valor crítico en la función de distribución acumulada de χ^2; en este caso se eligió el rendimiento de 7.16 t·ha^{-1} asociado a la función cúbica que involucra al N. Considerando este resultado, el 40 % de las observaciones constituyeron la sub-población de alto rendimiento.

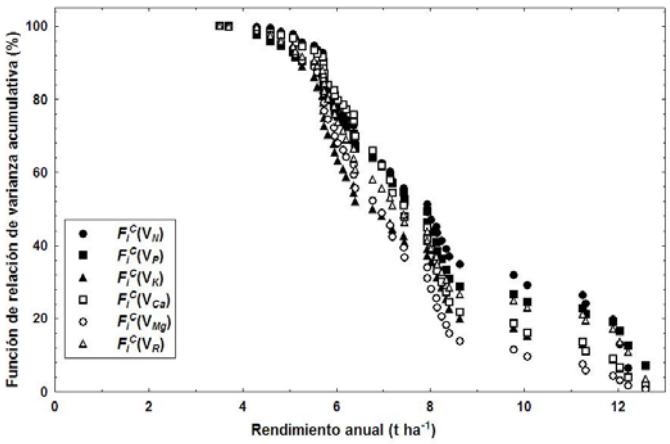

FIGURA 1. Relaciones cúbicas experimentales entre el rendimiento en chile, cultivar caribe o chiltepín de *C. frutescens*, y las funciones de proporción de varianza acumulada en el arreglo S^5 para estimar el punto de inflexión y el rendimiento crítico para separar a las sub-poblaciones de alto y bajo rendimiento.

En el Cuadro 2 se presentan las normas preliminares de DNC como medias y desviaciones estándar (V_X^* y SD_X^*, respectivamente) para este cultivar de *C. frutescens*, así como los rangos de concentración óptima correspondientes a cada nutrimento. Estos rangos óptimos propuestos sugieren diferencias interesantes entre este cultivar de *C. frutescens* y algunos cultivares convencionales de *C. annuum*. Por ejemplo, los rangos óptimos nutrimentales foliares en primera floración que han sido reportados para *C. annuum*: N = 4.0-5.0 %, P = 0.3-0.5 %, K = 2.5-5.0 %, Ca = 0.9-1.5 y Mg = 0.3-0.6 % (Hochmuth,1997); mientras que para la primera fructificación: N = 2.9-4.6 %, P = 0.3-0.5 %, K = 2.6-5.5 %, Ca = 1.3-3.7 % y Mg = 0.3-1.2 % (Piggot,1986); aunque dichas cifras sugieren que las diferencias dependen de la etapa fenológica o de la fecha de muestreo para el caso de *C. annuum*. Al contrastar las concentraciones óptimas del Cuadro 2 con esos valores, se aprecia que *C. frutescens* cv. Chiltepín presenta menores concentraciones de N y mayores concentraciones de P, K

CUADRO 1. Modelos cúbicos y rendimiento en los puntos de inflexión para cada función asociada a proporción de logaritmos centrados versus rendimiento en *C. frutescens* (cv. Chiltepín) (n = 47) en la población estudiada (n = 50).

Nutrimento *X*	$F_i^C(V_X) = aY^3 + bY^2 + cY + d$	R^2	Rendimiento (t·ha^{-1}) en los puntos de inflexión (*-b / 3a*)
N	$0.2386Y^3 - 5.1297Y^2 + 21.039Y + 86.913$	0.9647	7.16
P	$0.2928Y^3 - 6.2023Y^2 + 27.452Y + 72.364$	0.9765	7.06
K	$0.2118Y^3 - 3.7854Y^2 + 4.4736Y + 132.15$	0.9680	5.95
Ca	$0.4791Y^3 - 10.651Y^2 + 58.535Y + 9.181$	0.9784	0.11
Mg	$0.4161Y^3 - 8.5382Y^2 + 37.418Y + 64.144$	0.9736	0.11
R	$0.2993Y^3 - 6.1227Y^2 + 24.301Y + 85.383$	0.9655	6.81

CUADRO 2. Normas preliminares (Media y DE de las V_X^*) de diagnóstico de nutrimento compuesto (DNC) para d = 5 nutrimentos y rangos de concentración óptimos (concentración media y desviación estándar, DE) en *C. frutescens* (cv. Chiltepín) con un rendimiento de referencia de 7.16 t·ha^{-1}.

Relaciones logarítmicas centradas	Media V_X^*	DE V_X^*	Nutrimento	Media (g·kg^{-1})	DE (g·kg^{-1})
V_N^*	0.151	0.168	N	36.62	6.67
V_P^*	-1.639	0.310	P	6.53	2.93
V_K^*	0.537	0.090	K	53.29	6.10
V_{Ca}^*	-0.958	0.218	Ca	12.26	3.29
V_{Mg}^*	-1.444	0.156	Mg	07.46	1.70
$V_{R_5}^*$	3.352	0.153	R	883.80	14.92
$\sum V_X$	0	-			

y Mg que *C. annuum* en primera floración; mientras que con respecto a las evidenciadas en primera fructificación las concentraciones asociadas a las normas de DNC propuestas para *C. frutescens* cv. Chiltepín son menores para Ca y mayores para los casos de P y K.

Por otro lado, García *et al*. (2004) definieron los siguientes rangos de concentración óptima, asociados a normas preliminares de DNC para *C. annuum* tipo "güero", cv. Santa Fé que creció en un suelo calcáreo: 3.92-5.13 % para N, 0.27-0.37 % para P, 3.71-4.7 % para K, 2.37-3.05 % para Ca y 0.6-0.75 % para Mg. De manera que los rangos propuesto para *C. frutescens* cv. Chiltepín (Cuadro 2) son menores que los reportados por García-Hernández *et al*. (2004) para N y Ca. En cambio los rangos de las normas de DNC asociados a P, K y Mg son mayores que los de *C. annuum* tipo "güero", cv. Santa Fé.

Por otra parte, en un estudio para determinar las normas de DNC en *C. annuum* tipo "mirasol", Valdez *et al*. (2005) encontraron los siguientes rangos óptimos (asociados a la sub-población de alto rendimiento) de composición foliar: 4.74-5.9 % para N, 0.28 %-0.34 % para P, 5.36-5.91 % para K, 2.34-3.04 % para Ca y 0.69-0.87 % para Mg. Así, los rangos asociados a las normas del Cuadro 2 son menores que los propuestos para *C. annuum* tipo "mirasol" en los casos de N y Ca, pero mayores para el P y posiblemente Mg.

De lo discutido en los párrafos precedentes se desprende el que *C. frutescens* cv. Chiltepín concentra en su tejido foliar menores cantidades de N y Ca, y presenta la tendencia de concentrar mayores cantidades de P y Mg que *C. annuum* tipo "mirasol" y tipo "güero", cv. Santa Fé, cuando se practica su cultivo en suelos calcáreos. Estos resultados confirman que es importante realizar la validación de las normas que se establecen para una localidad con condiciones edafo-climáticas específicas.

Las normas preliminares de DNC identificadas fueron utilizadas para estimar los índices nutrimentales de DNC (I_N, I_P, ..., I_R) y de desbalance (DNC r^2) para cada observación. Los datos de DNC r^2 se ajustaron significativamente ($R^2 > 0.999$; $p < 0.0001$) a la función de distribución χ^2 (Figura 2). El valor crítico de χ^2 debe ser considerado en los trabajos de validación de las normas de DNC, porque cada base de datos independiente debe estar caracterizada teóricamente por un valor similar (Khiari *et al*., 2001).

Interacción entre nutrimentos

El análisis de componentes principales (ACP) se realizó con los índices de DNC considerando tres casos: la base de datos completa (50 observaciones) y las sub-poblaciones de alto (20 observaciones) y bajo rendimiento (30 observaciones). Los coeficientes de correlación significativos en el ACP fueron obtenidos de la forma sugerida por Gutiérrez *et al.* (2002) a través de la rotación de los

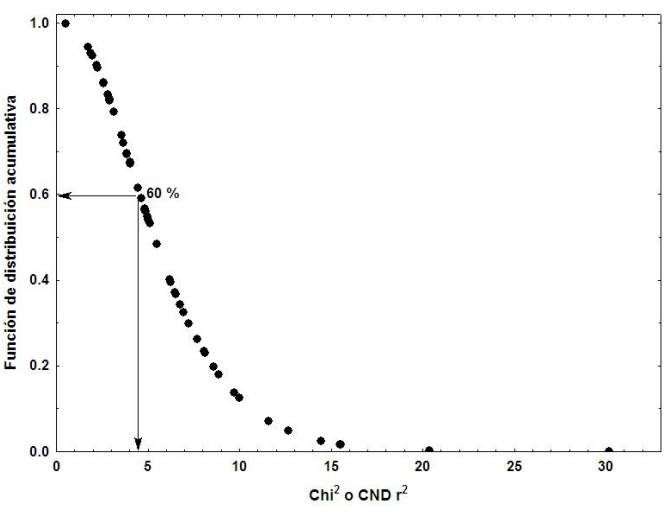

FIGURA 2. Función de distribución acumulada de χ^2 con seis grados de libertad para obtener el valor crítico teórico de DNC r^2 en el arreglo S^5 asociado al 60 % de la población (subpoblación de bajo rendimiento).

componentes para maximizar la variación. En el caso de la población completa, los primeros dos componentes principales (CP's) explicaron el 82.4 % de la varianza total (Cuadro 3). En los otros dos casos (alto y bajo rendimiento), los primeros dos CP's explicaron el 83.2 % de la varianza total.

Se aprecia que la estructura de los CP's, en cada caso, es definida por diferentes variables. En el caso de la población completa (Cuadro 3), el primer CP está positivamente correlacionado con I_N e I_P, y negativamente con I_{Ca} e I_{Mg}, sugiriendo las interacciones positivas significativas N-P y Ca-Mg. Este componente indica también las siguientes

CUADRO 3. Coeficientes de correlación entre los dos primeros componentes principales (CP's) y los índices de DNC para la población completa (50 observaciones), y las sub-poblaciones de alto (20 observaciones) y bajo rendimiento (30 observaciones) en *C. frutescens* (cv. Chiltepín) calculados a partir de la matriz normalizada con rotación de los CP's para maximizar la varianza.

Indices CND	PC1[z]	PC2[z]	PC1[y]	PC2[y]	PC1[x]	PC2[x]
I_N	**0.741**	0.361	**0.868**	0.213	**0.769**	0.084
I_P	**0.752**	-0.593	0.504	**-0.834**	0.587	**0.721**
I_K	0.265	**0.811**	0.413	**0.740**	0.606	**-0.685**
I_{Ca}	**-0.937**	-0.206	**-0.933**	0.089	**-0.950**	-0.186
I_{Mg}	**-0.920**	-0.202	**-0.930**	0.003	**-0.933**	-0.175
I_R	0.146	**0.886**	0.056	**0.880**	**0.723**	-0.573
Varianza explicada	2.934	2.011	2.921	2.073	3.602	1.392
Proporción del total	0.489	0.335	0.486	0.345	0.600	0.232

Valores en negritas son los dominantes en las cargas eigenvector en nivel de significancia > 0.7.
[z]Valores para la base de datos completa.
[y]Valores para la sub-población de alto rendimiento.
[x]Valores para la sub-población de bajo rendimiento.

interacciones negativas: N-Ca, N-Mg, P-Ca y P-Mg. El segundo CP (correlacionado positivamente con I_K *e* I_R) sugiere, a su vez, la interacción positiva significativa K-R.

Para la sub-población de alto rendimiento (Cuadro 3), la estructura del CP1 está definida por I_N, I_{Ca} e I_{Mg}; así entonces, el CP1 sugiere las siguientes interacciones: positiva entre Ca y Mg, como para el caso de la población completa; negativas entre N y Ca, y N y Mg. El segundo CP presenta una estructura definida por I_P de manera negativa I_K *e* I_R de manera positiva, al igual que en el caso de la población completa. De esta manera es posible definir las siguientes interacciones significativas: positiva K-R y negativas P-K y P-R.

En el caso de la sub-población de bajos rendimientos, la estructura del CP1 está definida positivamente por I_N e I_R y negativamente por I_{Ca} e I_{Mg}; lo cual indica la posible importancia de las siguientes interacciones: N-R y Ca-Mg positivas; y N-Ca, N-Mg, Ca-R y Mg-R negativas. La estructura del CP2 está claramente definida por un posible antagonismo entre P y K.

Con el fin de esclarecer si las interacciones evidenciadas, como importantes mediante el análisis de componentes principales, son discriminantes significativamente entre las sub-poblaciones de alto y bajo rendimiento, se realizaron pruebas de *t* y *F*. De acuerdo a los resultados (Cuadro 4), las interacciones N/P y Mg/R con la prueba de *t* y Mg/R, K/R y P/Ca con la prueba de *F*, se asocian a niveles altamente significativos (P<0.05) en la discriminación entre las sub-poblaciones de alto y bajo rendimiento en este cultivar de la especie *C. frutescens* en la condición edafo-climática ya descrita. De tales expresiones nutrimentales, solo el sinergismo entre K y R está presente en las estructuras de los CP's en la población completa y la sub-población de alto rendimiento, mientras que el antagonismo Mg/R está definido como importante en la estructura de uno de los CP's asociado únicamente a la población de bajo rendimiento (Cuadro 3). De hecho, la interacción Mg/R es la más significativa en ambas pruebas (Cuadro 4); por lo tanto, puede considerase como la expresión nutrimental más discriminante entre ambas sub-poblaciones.

Muchos de los aparentes efectos antagónicos y sinérgicos entre nutrimentos observados en este cultivar han sido ya ampliamente reconocidos y reportados en otras especies. Sin embargo, algunas interacciones no han sido plenamente explicadas con bases fisiológicas sólidas o bien existe muy poca información al respecto. La relación N-P, que fue evidenciada en el análisis de componentes principales (Cuadro 3), resultó ser uno de los factores más significativos para discriminar las sub-poblaciones de alto y bajo rendimiento (Cuadro 4). Sumner y Farina (1986) aseguran que la interacción N-P es la más importante económicamente de entre las que se involucra al P. El N es componente central de aminoácidos y proteínas, mientras que el P es utilizado para transformaciones de energía metabólica.

La interacción positiva Ca-Mg que fue identificada en este estudio también se ha encontrado en chile güero, frijol cowpea y sábila, en condiciones experimentales de suelo y clima similares (García *et al*., 2004; 2005; 2006). Raghupathi *et al*. (2002) también encontraron una interacción Ca-Mg positiva en plátano cultivado en suelo Aquic haplustalf. Sin

CUADRO 4. Estimadores estadísticos descriptivos (Media y desviación estándar, DE) de las sub-poblaciones de alto y bajo rendimiento y pruebas de *t* y *F* para las interacciones nutrimentales importantes identificadas mediante el análisis de componentes principales.

Interacción nutrimental	Sub-población de alto rendimiento		Sub-población de bajo rendimiento		Valor-*t*	p	Valor-*F*	p
	Media	DE	Media	DE				
N/P	6.289	1.938	5.103	1.452	**2.472**	0.017	1.8	0.156
Ca/Mg	1.640	0.242	1.718	0.253	-1.086	0.282	1.1	0.855
K/R	0.060	0.007	0.063	0.004	-1.849	0.070	**2.5**	0.028
N/R	0.041	0.008	0.042	0.007	-0.247	0.805	1.2	0.609
N/Ca	3.236	1.197	3.007	1.661	0.530	0.598	1.9	0.138
N/Mg	5.148	1.513	4.888	1.851	0.522	0.604	1.5	0.362
P/Ca	0.562	0.263	0.633	0.419	-0.672	0.504	**2.5**	0.037
P/Mg	0.890	0.363	1.023	0.460	-1.080	0.285	1.6	0.286
P/K	0.120	0.044	0.138	0.040	-1.448	0.153	1.2	0.624
P/R	0.007	0.003	0.008	0.002	-1.570	0.122	1.8	0.167
Ca/R	0.013	0.003	0.016	0.005	-1.661	0.103	1.9	0.160
Mg/R	0.042	0.007	0.027	0.020	**2.986**	0.004	**8.3**	0.000

Valores *t* y *F* en negritas son significativos a una $P \leq 0.05$.

embargo, en otros tipos de suelo, ésta interacción es generalmente negativa, considerando que el ion Ca^{2+} es fuertemente competitivo con el catión Mg^{2+} en la mayoría de los sustratos (Grattan y Grieve, 1999).

La interacción negativa N-Ca puede ser consecuencia de una correlación negativa entre los iones NH_4^+ y Ca^{2+} (Marschner, 1986), aunque esta interacción no fue identificada como una de las más significativas con las pruebas de *t* y *F* (Cuadro 4). El antagonismo N-Mg ya ha sido reportado en nopal (Magallanes *et al*., 2005), aunque no se ha dado alguna explicación desde el punto vista fisiológico.

El antagonismo P-Ca ha sido ya reportado por Parent *et al*. (1994) y otros autores. De acuerdo con Tunesi *et al*. (1999), la naturaleza calcárea de un suelo puede reducir la disponibilidad de P para las plantas, debido a que la alta concentración de Ca^{2+} intercambiable promueve la precipitación de P insoluble. La interacción negativa P-Mg puede estar relacionada con el metabolismo vegetal y el proceso temporal de dilución-acumulación (Marschner, 1986). Además, debe resaltarse que la concentración de Mg es mayor que la de P en este cultivar (Cuadro 2). Este resultado refuerza la tendencia de *C. frutescens* a acumular mayores cantidades de Mg (0.74±0.17 $g \cdot kg^{-1}$) que las que han sido reportadas para cultivares convencionales de C. *annuum* (0.3-0.6 $g \cdot kg^{-1}$) (Hochmuth, 1997; García *et al*., 2004).El antagonismo P-K no ha sido explicado fisiológicamente; sin embargo, Reneau *et al*., (1983) (citados por Sumner y Farina, 1986) demostraron que la interacción P-K es importante en la producción de sorgo.

Además de lo anterior, el ACP indica que R interactuó significativamente con los otros cinco nutrimentos: con K en la población completa, con P y K en la sub-población de alto rendimiento y con N, Ca y Mg en la sub-población de bajo rendimiento. Esta situación sugiere la importancia del balance entre el nutrimento de relleno R con los otros cinco nutrimentos, así como que todas esas interacciones pueden ser importantes en la diferenciación entre altos y bajos rendimientos para este cultivar.

CONCLUSIONES

El valor de rendimiento que permite separar a la sub-población de altos de la de bajos rendimientos en el cultivar chiltepín (*C. frutescens*) fue de 7.16 $t \cdot ha^{-1}$.

Las normas preliminares de diagnóstico de nutrimento compuesto, tomando como referencia un rendimiento mayor a 7.16 $t \cdot ha^{-1}$, se asocian a la siguiente composición foliar óptima (media±desviación estándar): N = 3.66±0.66 %, P = 0.65±0.29 %, K = 5.32±0.61 %, Ca = 1.22±0.32, y Mg = 0.74±0.17%.

Capsicum frutescens cv. Chiltepín concentra en su tejido foliar menores cantidades de N y Ca, y presenta la tendencia de concentrar mayores cantidades de P y Mg que *C. annuum* tipo “mirasol” y tipo “güero”, cv. Santa Fé, cuando se practica su cultivo en suelos calcáreos.

Las siguientes interacciones nutrimentales fueron identificadas: dos sinergismos (N-P y Ca-Mg); y cuatro antagonismos (N-Ca, N-Mg, P-Ca, P-Mg y P-K).

Puesto que la expresión nutrimental Mg/R es el factor más significativo para discriminar las sub-poblaciones de alto y bajo rendimiento, es recomendable continuar con la investigación acerca de las interacciones nutrimentales entre el Mg y otros nutrimentos cuya concentración no se determinó en hojas de las plantas de *C. frutescens* cv. Chiltepín.

La importancia de la interacción Mg/R radica posiblemente en la tendencia de *C. frutescens* cv. Chiltepín de concentrar en su tejido foliar más Mg que C. *annuum* y en el hecho de que las interacciones con el nutrimento de relleno (R) manifestaron ser importantes para lograr el balance nutrimental en el presente estudio.

LITERATURA CITADA

BLANCO-MACÍAS, F.; LARA-HERRERA, A.; VALDEZ-CEPEDA, R. D.; CORTÉS-BAÑUELOS, J. O.; LUNA-FLORES, M. SALAS-LUÉVANO, 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.

CHENG, K. L.; BRAY, R. H. 1951. Determination of calcium and magnesium in soil and plant material. Soil Science 72: 449-458

GARCÍA-HERNÁNDEZ, J. L.; VALDEZ-CEPEDA, R. D.; MURILLO-AMADOR, B.; NIETO-GARIBAY, A.; BELTRÁN, 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 and 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, J.; TROYO-DIÉGUEZ, E. 2005. Preliminary compositional nutrient diagnosis norms for cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp) grown on desert calcareous soil. Plant and Soil 217(1-2): 297-307.

GARCÍA-HERNÁNDEZ, J. L.; VALDEZ-CEPEDA, R. D.; MURILLO-AMADOR, B.; BELTRÁN, F. A.; RUIZ, F. H.; ORONA-CASTILLO, I.; FLORES, A.; TROYO-DIÉGUEZ, E. 2006. Preliminary compositional nutrient diagnosis norms in *Aloe vera* L. grown on calcareous soil in an arid environment. Environmental and Experimental Botany 58(1-3): 244-252.

GRATTAN, S. R.; GRIEVE, C. M. 1999. Salinity-mineral nutrient relations in horticultural crops. Scientia Horticulturae 78: 127-157

GUTIÉRREZ-ACOSTA, F.; VALDEZ-CEPEDA, R. D.; BLANCO-MACÍAS, F. 2002. Multivariate analysis of cactus pear (*Opuntia* spp.) fruits from a germplasm collection. Acta Horticulturae 58: 111-118.

HERNÁNDEZ-VERDUGO, S.; LUNA-REYES, R.; OYAMA, T. 2001. Genetic structure and differentiation of wild and domesticated populations of *Capsicum annuum* (Solanaceae) from Mexico. Plant Syst. Evol. 226: 129-142.

HOCHMUTH, G. J. 1997. Pepper production guide for Florida, Commercial Vegetable Guide Series, Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida.

KHIARI, L.; PARENT, L. E.; TREMBLAY, N. 2001. Selecting the high-yield subpopulation for diagnosing nutrient imbalance in crops. Agronomy Journal 93: 802-808.

KNUDSEN, D.; PETERSON, G. A.; PRAT, P. F. 1982. Lithium, sodium and potassium. pp. 403-430. *In*: PAGE, A. L. (ed.) Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. ASA Monograph 9, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.

MAGALLANES-QUINTANAR, R.; VALDEZ-CEPEDA, R. D.; BLANCO-MACÍAS, F.; MÁRQUEZ-MADRID, M.; RUIZ-GARDUÑO, R. R.; PÉREZ-VEYNA, O.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, J. L.; MURILLO-AMADOR, B.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. D.; MARTÍNEZ-RUBÍN DE CELIS, E. 2005. 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, E.; PÉREZ-VEYNA, O.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, J. L.; LÓPEZ-MARTÍNEZ, J. D. 2006. Compositional nutrient diagnosis in maize grown in calcareous soil. Journal of Plant Nutrition 29: 2019-2033.

MARSCHNER, H. 1986. Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, London.

MICROSOFT CORP. 2000. Microsoft Excel 2000 (Computer Program Manual). Troy, NY, USA.

PARENT, L. E.; DAFIR, M. 1992. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. J. Am. Soc. Hortic. Sci. 117: 239-242

PARENT, L. E.; CAMBOURIS, A. N.; MUHAWENIMANA, A. 1994. Multivariate diagnosis of nutrient imbalance in potato crops. Soil Sci. Soc. Am. J. 58: 1432-1438.

PIGGOT, T. J. 1986. Vegetable crops. pp. 147-187. *In*: REUTER, D. J.; ROBINSON J. B. (Eds.). Plant Analysis: An Interpretation Manual. Inkata Press. Sydney, Australia.

RAGHUPATHI, H. B.; REDDY, B. M. C.; SRINIVAS, K. 2002 Multivariate diagnosis of nutrient imbalance in banana. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 33: 2131-2143

STATSOFT INC. 2004. Statistica for Windows (Computer Program Manual). StatSoft, Inc., Tulsa, OK, USA.

SUMNER, M. E.; FARINA, M. P. W. 1986. Phosphorus interactions with other nutrients and lime in field cropping systems. Adv. Soil Sci. 5: 2101-236

TUNESI, S.; POGGI, V.; GESSA, C. 1999. Phosphate adsorption and precipitation in calcareous soils, the role of calcium ions in solution and carbonate minerals. Nutrient Cycling Agroecosystems 53: 219-227.

USSL (US Salinity Laboratory). 1954. Carbonate and bicarbonate by titration with acid. pp. 98-108. *In:* RICHARDS LA (ed.) Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils. USDA Agricultural Handbook 60. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, USA.

VALDEZ-CEPEDA, R. D.; MAGALLANES-QUINTANAR, R.; RUBIO, S.; GARCÍA-HERNÁNDEZ, J. L.; MURILLO-AMADOR, B.; TROYO-DIEGUEZ, E.; BLANCO, F. 2005. Normas nutrimentales DNC para chile (*Capsicum annuum*) tipo 'Mirasol' seco. pp. 150-157. *In:* Second World Pepper Convention. Zacatecas, México. 14-16 agosto de 2005. Zacatecas, Zac., México.