



UNIVERSIDAD JUÁREZ DEL ESTADO DE DURANGO



DOCTORADO INSTITUCIONAL EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y FORESTALES

Análisis de diagnóstico de nutrimento compuesto
y de interacciones nutrimentales en chile jalapeño
(*Capsicum annuum L.*)

Por:

José Apolinar Ramírez Ibarra

Como requisito parcial para obtener el grado de

DOCTOR EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y FORESTALES

Opción terminal: Agricultura Sustentable.

Director de tesis: Dr. José Luis García Hernández

Durango, Dgo., México.

2016

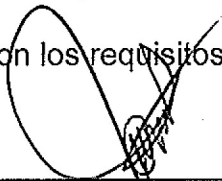
Universidad Juárez del Estado de Durango

Doctorado Institucional en Ciencias Agropecuarias y Forestales

Los abajo firmantes, certifican que la tesis de doctorado que se presenta como requisito parcial para la obtención del Grado de Doctor en Ciencias Agropecuarias y Forestales por parte de

José Apolinar Ramírez Ibarra

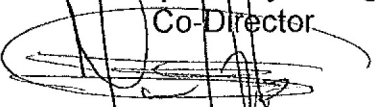
ha cumplido con los requisitos estipulados por la UJED



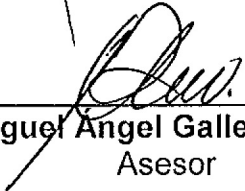
Dr. José Luis García Hernández
Director de tesis



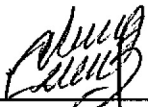
Dr. Enrique Troyo Dieguez
Co-Director



Dr. Manuel Fortis Hernández
Asesor



Dr. Miguel Ángel Gallegos Robles
Asesor



Dr. Cirilo Vázquez Vázquez
Asesor



AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para cursar el doctorado. Asimismo por el apoyo financiero a través del proyecto SEP-CONACYT-CB 257808.

Al Doctorado Institucional en Ciencias Agropecuarias y Forestales en especial al Departamento de Estudios de Postgrado de la Facultad de Agricultura y Zootecnia (FAZ-UJED), por de manera amable darme la oportunidad de realizar mis estudios de doctorado.

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) y al Doctor Enrique Troyo Dieguez de manera muy especial por todo su apoyo y tiempo durante la estancia de investigación en esta institución y por ser parte de mi comité de tesis.

Al M. C. Baudilio Acosta Vargas, I. B. Q. Griselda Peña Armenta, I. B. Q. María Dolores Rondero Astorga y M. C. Roberto Hernández Herrera del CIBNOR por su valiosa asesoría y apoyo durante el trabajo de análisis nutrimental foliar en laboratorio.

Muy especialmente al Dr. José Luis García Hernández por su dirección y asesoría y amistad durante todo el desarrollo del proyecto.

Al Dr. Manuel Fortis Hernández por su apoyo y asesoría desde la etapa de maestría y ahora doctorado

Al Dr. Miguel Ángel Gallegos Robles y Dr. Cirilo Vázquez Vázquez por su asesoría, apoyo y aportes a mi formación profesional.

A mis compañeros Alejandra, Rosy y Juan Luis por el tiempo compartido, conocimientos, consejos y apoyo para poder terminar esta etapa satisfactoriamente. Y por la confianza de que dentro de poco ellos también lo harán.

DEDICATORIAS

Al poder superior

A mi esposa Ana Rosa Arroyo Alonso y mi hijo José Alberto por ser mi equipo favorito y por recibirme siempre con una sonrisa.

A la familia Ramírez Ibarra por apoyarme cuando se ha requerido, en especial a Ricardo y Alexis.

A la familia Arroyo Alonso por todo su apoyo y cariño hacia nuestra familia que apenas comienza.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIAS	iv
ÍNDICE	v
LISTA DE CUADROS	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
RESUMEN	ix
SUMMARY	x
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivos	3
Hipótesis.....	3
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
Importancia de la nutrición vegetal.....	4
Factores que intervienen en la absorción de nutrientes por las plantas.....	4
Factor interno (de la planta)	5
Factor externo del ambiente.....	5
Características de cada nutriente	6
Procesos bioquímicos implicados en la nutrición vegetal	6
Procesos eco-fisiológicos implicados en la nutrición vegetal	7
Nutrientes esenciales.....	8
Nitrógeno	10
Fósforo	12
Potasio.....	14
Calcio.....	14
Magnesio.....	15
Los métodos de diagnóstico	15
Método cualitativo:.....	15
Métodos cuantitativos:	16
Descripción de las técnicas de diagnóstico nutrimental vegetal y términos más usados en nutrición vegetal	16

Nivel crítico	16
Sistema integrado de diagnóstico y recomendación (DRIS)	16
Diagnóstico de nutrimento compuesto o <i>compositional nutrient diagnosis</i> (CND)	17
Importancia del cultivo de chile	17
Desde el punto de vista genético	17
Desde el punto de vista económico	18
Importancia del chile jalapeño en la Comarca Lagunera	18
Propiedades del chile	18
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS	19
Establecimiento del cultivo	19
Preparación del terreno	19
Siembra y cuidado de la plántula	19
Trasplante en campo	20
Labores culturales	20
Muestreo y análisis foliar	20
Muestreo	20
Obtención del rendimiento	20
Análisis foliar	21
Identificación de normas nutrimentales	21
Selección de la subpoblación con alto rendimiento	22
Interacciones nutrimentales	25
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
RESULTADOS	26
Normas de Diagnóstico de Nutrimento Compuesto	26
Correlaciones entre nutrimentos y rendimiento	29
DISCUSIÓN	33
Normas de Diagnóstico de Nutrimento Compuesto	33
Correlaciones entre nutrimentos y rendimiento	35
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES	37
LITERATURA CITADA	38

LISTA DE CUADROS

Cuadro	Página
Cuadro 1. Lista de elementos esenciales o nutrientes esenciales para las plantas.....	9
Cuadro 2. Rendimiento de chile jalapeño cv. Autlán en los puntos de inflexión de las funciones de varianza acumulada de la proporción de logaritmos centrados en la población estudiada (n=100).....	27
Cuadro 2a. Normas preliminares (Media V_x y DE de las V_x) de DNC para $d = 5$ nutrimentos y rangos de concentración óptimos (Media y DE) en chile jalapeño con un rendimiento de referencia de $52.09 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$	28
Cuadro 3. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson (r), entre rendimiento ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y concentración de nutrimentos (%) en la población completa (n=100).....	30
Cuadro 4. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson (r), entre la subpoblación de altos rendimientos ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) consistente de 20 observaciones y concentración de nutrimentos (%) en tejido vegetal de chile jalapeño Autlán.....	31
Cuadro 5. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson (r), entre la subpoblación de bajos rendimientos ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) consistente de 80 observaciones y la concentración de nutrimentos (%) en tejido vegetal de chile jalapeño Autlán.....	32
Cuadro 6. Concentraciones nutrimentales óptimas citadas en la literatura para diferentes especies y/o tipos del genero <i>Capsicum</i> y para algunas crasuláceas.....	34

LISTA DE FIGURAS

Figura	Página
<p>Figura 1. Relación entre el rendimiento de chile jalapeño Autlán y la varianza acumulada en el arreglo S^5 para estimar el punto de inflexión.....</p>	27
<p>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 (3.2) asociado al 80 % de la población (subpoblación de bajo rendimiento).....</p>	29

RESUMEN

El chile (*Capsicum annuum* L.) es de las hortalizas más importantes a nivel mundial, tanto por su volumen de producción en fresco, su redituabilidad y sus múltiples usos. Su aprovechamiento se da principalmente como alimento humano por sus extraordinarias propiedades nutraceuticas, aunque es sumamente importante en numerosas industrias. Por ello, es fundamental conocer cada vez mejor los requerimientos nutricionales específicos de cada genotipo de chile a establecer, así como su interacción con los diversos ambientes donde se produce. Los objetivos de este estudio fueron: a) estimar las normas nutrimentales mediante la técnica de diagnóstico de nutrimento compuesto (DNC) para chile jalapeño Autlán en la Comarca Lagunera durante el ciclo primavera-verano de 2013 y b) analizar las interacciones nutrimentales entre los nutrimentos y su relación con el rendimiento por medio de correlaciones de Pearson. Para lo cual se tomó una muestra $n= 100$ plantas a las que se les determinó el contenido de N, P, K, Ca y Mg y se relacionó con el rendimiento. Dentro de los resultados, se calculó un rendimiento mínimo de referencia de 52.09 Mg ha^{-1} , considerando esto, se determinaron los rangos óptimos de estos macro-nutrimentos en el tejido foliar también llamados normas nutrimentales. Se presentaron los sinergismos: N y P, N y K, P y K, Ca y Mg. Mientras que el fósforo fue el único nutrimento que presentó correlación positiva con el rendimiento. **Palabras clave:** rendimiento, correlaciones, normas nutrimentales, chile jalapeño.

SUMMARY

Pepper (*Capsicum annuum* L.) is one of the most important vegetables around the world, that is for its fresh fruit production, its profitability and the multiple uses of this fruit. Main use is as food for human because it has outstanding nutraceutical properties, but also it is very important in a number of industrial aspects. For these reasons, it is fundamental to know every time better the specific nutritional requirements of each genotype to grow, as well as its interaction with the several environments where it is cropped. The aims of this study were: *a)* to estimate nutrient norms by using the technique of compositional nutrient diagnosis (DNC) for hot pepper type jalapeño Autlán in Comarca Lagunera during the cycle spring-summer 2013 and *b)* to analyze the nutritional interactions among the nutrients and its relationship with yield by using the Pearson correlations approach. With this purpose it was taken a sample $n= 100$ plants on which was determined the content of N, P, K, Ca and Mg and determinations were correlated to yield. As results, it was calculated a minimum reference yield of 52.09 Mg ha^{-1} , regarding this, optimal ranges of these macro-nutrients on foliar tissue were determined, these are also called nutrient norms. There were observed the following synergisms: N and P, N and K, P and K, Ca and Mg. While phosphorus was the unique nutrient that showed positive correlation to yield. **Key Words:** yield, correlations, nutritional norms, hot pepper type jalapeño.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El cultivo de chile (*Capsicum annuum* L.) pertenece a la familia solanácea. Se produce en grandes áreas a lo largo del mundo logrando una producción de 31 millones de toneladas en 2012 (FAOSTAT, 2016).

Su importancia radica en su valor nutraceútico y su gran popularidad en la alimentación en México y muchos otros países del mundo (Vera-Guzmán *et al.*, 2011). Actualmente se reconoce aún más su importancia debido a que es uno de los productos con mayor concentración de vitamina C (Mateos *et al.*, 2013). Además de las múltiples propiedades terapéuticas en enfermedades de humanos (González-Zamora *et al.*, 2015). Su alto contenido de vitaminas (principalmente A y C), su sabor agradable y estimulante, ya sea en variedades dulces o picantes, hacen que esté presente en miles de recetas de cocina de todos los países del mundo (Bortolotti, 2013). Su popularidad y demanda es creciente a nivel mundial (Caro *et al.*, 2014), por lo que actualmente es considerada una de las especies vegetales más versátiles usadas en la cocina (Bosland, 2010).

El fruto de los chiles de la especie *C. annuum* tiene efectos medicinales, entre ellos: actuar contra ciertos tipos de cáncer y estimular el sistema inmunológico, prevenir las enfermedades cardiovasculares y retrasar el proceso de envejecimiento, gracias a los antioxidantes que contiene (Chuah, 2008, González-Zamora *et al.*, 2013). Por otro lado, dentro de la gran variedad de tipos de chile que se cultivan en México, el jalapeño es de los de mayor importancia económica por su amplio consumo, alta rentabilidad y gran demanda de mano de obra (Macías-Duarte *et al.*, 2012). Sin embargo, su producción comercial exitosa requiere que el productor haga uso óptimo de los recursos disponibles y un factor determinante en el desarrollo del cultivo es la nutrición del cultivo. Tomando en cuenta que la población mundial humana ha crecido a un ritmo muy acelerado y se estima que será de 2 400 millones de personas más para el año 2050 (Delgado *et al.*, 2011), es inherente que necesitemos optimizar los recursos para cumplir con los requerimientos alimenticios de esta población. El desafío es que cada uno de los cultivos que produzcamos, lo

hagamos de una manera en que se armonicen la producción agrícola económicamente viable y a la vez se cuide el ambiente.

En el contexto presentado, se han desarrollado algunas técnicas de diagnóstico nutrimental de las plantas cultivadas (García-Hernández *et al.*, 2005). Entre ellas se encuentran las siguientes: valor crítico, VC (Bates, 1971); sistema integrado de diagnóstico y recomendación, DRIS (Walworth y Sumner, 1987) y diagnóstico de nutriente compuesto, DNC (Parent y Dafir, 1992). En el caso de la técnica de VC, una concentración se define arbitrariamente. Aquí, por lo general se considera el 90 ó 95 % del rendimiento máximo y se supone que; excepto el nutrimento del caso, los demás están en cantidades suficientes y no excesivas. En los casos de DRIS y DNC la población de altos rendimientos se selecciona de manera diferente. Con respecto al DRIS, no se ha establecido un procedimiento formal para dividir el total de observaciones en dos grupos: uno de alto rendimiento y otro de bajo rendimiento. Esa partición sí se logra con la técnica del DNC al considerar la relación cúbica entre el rendimiento y cada una de las funciones de proporción de varianza acumulada (Parent y Dafir, 1992). En otras palabras, la técnica DNC se sustenta en procedimientos estadísticos más robustos. Khiari *et al.* (2001); entre otros investigadores, demostraron que los índices nutrimentales estimados con la técnica DNC se distribuyen simétricamente con respecto a un valor nulo de balance nutrimental y que también se correlacionan mejor con el rendimiento que los estimados a través de las técnicas DRIS y VC. Por lo anterior, se decidió usar a la técnica DNC en el presente trabajo, además de que DNC ha sido usado en cultivos anuales (Arroyo-Vargas *et al.*, 2013) y especies perennes como sábila (*Aloe vera*) y nogal (*Carya illinoensis*) (García-Hernández, 2006; 2009).

Objetivos

Estimar las normas nutrimentales mediante la técnica de diagnóstico de nutriente compuesto para chile jalapeño en la Comarca Lagunera.

Identificar interacciones nutrimentales significativas entre los nutrientes y su relación con el rendimiento por medio de correlaciones de Pearson.

Hipótesis

Las normas generadas con la técnica de diagnóstico de nutriente compuesto sirven como base para el diagnóstico nutrimental y permiten desarrollar conocimientos sobre interacciones entre los nutrimentos N, P, K, Ca y Mg en el cultivo de chile jalapeño.

CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA

Importancia de la nutrición vegetal

La nutrición vegetal es una rama de la agronomía que se encarga de estudiar los procesos relacionados con la aportación y aprovechamiento de los nutrientes esenciales en los vegetales. Su estudio se ha orientado a la aportación de dichos nutrientes en los cultivos de mayor importancia por su extensión y volumen de producción (Sánchez-Chávez *et al.*, 2014).

Es indudable que el nutriente que más se ha estudiado en la nutrición vegetal es el nitrógeno. Sin embargo, todos los demás elementos esenciales se han estudiado y en todos los casos se pone atención debido a que enormes extensiones de áreas productivas son en muchos casos incapaces de aportar todos los nutrientes correctamente para las plantas. En ocasiones porque los suelos son pobres o deficientes en el contenido de algún nutriente; y en otras ocasiones por el deterioro o contaminación que ha sufrido el ambiente y particularmente el suelo donde se desarrolla la vida vegetal (Ríos *et al.*, 2014).

Por esas; y múltiples razones relacionadas se ha hecho indispensable profundizar en los estudios relacionados con la nutrición vegetal. Una de las áreas más importantes en la ciencia contemporánea es entender la estructura y dinámica de los sistemas complejos relacionados con la nutrición vegetal, ya que muchos sistemas físicos, bióticos y sociales están compuestos de múltiples componentes interactivos (Magallanes-Quintanar, 2005).

Factores que intervienen en la absorción de nutrientes por las plantas

En fisiología vegetal se entiende por absorción al proceso mediante el cual los nutrientes pasan a través de la membrana celular de la raíz de las plantas y éste se conoce como transporte a corta distancia. La absorción de nutrientes es un fenómeno que ocurre día a día y cada proceso metabólico de la planta requiere nutrientes cualitativa y cuantitativamente diferentes (Azofeifa y Moreira, 2005). Para que estos nutrientes puedan llevar a cabo su función específica se requieren otros

dos procesos, a saber: transporte de los nutrientes a la parte aérea (demandas) que es un transporte a larga distancia y por último la asimilación de los nutrientes, es decir su incorporación a moléculas orgánicas (metabolismo) (Marschner, 2012).

La absorción de nutrientes depende de diferentes factores tanto internos como externos, los más sobresalientes son:

Factor interno (de la planta)

Curva de absorción de nutrientes

Es la representación gráfica de la extracción de un nutriente y representa las cantidades de este elemento extraídas por la planta durante su ciclo de vida.

Para determinarla, debemos tomar en cuenta dos factores internos de la planta que son: El potencial genético de la planta y la edad de la planta, o estado de desarrollo de la misma. La curva necesariamente debe reflejar los cambios nutricionales dependientes de la fenología de la planta. Con esto se pueden asociar puntos de máxima absorción con puntos claves de desarrollo como prefloración, floración, fructificación, etc. Conociendo el comportamiento de las curvas de absorción se determinan las épocas de mayor absorción de nutrientes durante el ciclo de crecimiento. Esto a su vez permite definir las épocas de aplicación de los fertilizantes en los programas de fertilización, que generalmente deberán ocurrir una o dos semanas antes de este pico de alto requerimiento de nutrientes. Con esto se logra maximizar el aprovechamiento de los fertilizantes (Bertsch, 2005).

Factor externo del ambiente

Los factores externos son aquellos relacionados con el ambiente donde se desarrolla la planta como la temperatura, humedad del suelo, tipo de arcilla que predomine en el suelo, materia orgánica del suelo, pH, efecto de la concentración externa, efecto del ion acompañante, fotoperiodo, etc. (Sancho, 2005).

Características de cada nutriente

En las que podemos mencionar:

1. El mecanismo de absorción en la raíz de cada nutriente

Existen tres mecanismos de absorción en la raíz: difusión, flujo de masas e intercepción de raíces.

2. El tipo de transportador que utiliza cada nutriente. Estos pueden ser pasivos (Canales o transportadores uniport) o activos (con gasto de energía para la planta) y estos pueden ser primarios como las bombas de ATP o activos secundarios como el co-transportador, anti-transportador o uni-transportador (Marschner, 2012).

Procesos bioquímicos implicados en la nutrición vegetal

El agua, en su forma líquida, permite la difusión y el flujo masivo de solutos y por esta razón, es esencial para el transporte y distribución de nutrientes y metabolitos en toda la planta. El agua, que es el componente mayoritario en la planta (aproximadamente un 80-90% del peso fresco en plantas herbáceas y más del 50 % de las partes leñosas) afecta, directa o indirectamente, a la mayoría de los procesos fisiológicos. Por todo ello, la fisiología vegetal es, en gran medida, el estudio de las relaciones hídricas.

Sus moléculas son polares y forman puentes de hidrógeno entre sí; esto ocasiona un aumento en las temperaturas de fusión y ebullición. Se denomina cohesión a la tendencia de las moléculas de agua a permanecer unidas por los puentes de hidrógeno. Esta es la razón de por qué las columnas finas de agua en los vasos xilemáticos pueden ascender sin romperse hasta la cima de un árbol; la cohesión imprime a la columna una tensión muy alta (Sánchez y Aguirreolea, 2001).

Fotosíntesis

La fotosíntesis implica tanto a las reacciones luminosas y las reacciones oscuras asociadas con asimilación de C que se localizan en las células que contienen cloroplastos. Sin embargo, es claro que cualquier correlación entre la fotosíntesis y la productividad de la planta depende de una comprensión más completa del C dentro de la hoja y de la translocación posterior de asimilados a través del floema (Grodzinski, 1998).

El género *Capsicum* sp., pertenece al grupo de plantas C₃, las cuales tienen las siguientes características: su enzima carboxilante es la Rubisco, baja producción de materia seca comparada con las plantas C₄, si tienen fotorrespiración detectable y su requerimiento energético teórico 1:3:2 (CO₂; ATP; NADPH) entre otras (Salisbury y Ross, 1994).

Procesos eco-fisiológicos implicados en la nutrición vegetal

La gran diversidad ecológica de las plantas está directamente relacionada con la enorme variedad de formas, estructuras y funciones de las células individuales que las forman. Esta diversidad hace difícil generalizar las características de una célula (Revilla y Zarra, 2000).

Cada cultivo requiere condiciones agroecológicas de tipo de suelo, pH, temperaturas y fecha de establecimiento para tener un rendimiento óptimo (determinado teóricamente por la ley de Liebig (Salisbury y Ross, 1994).

El cultivo de chile (*Capsicum* sp.) es muy adaptable, pues lo podemos encontrar establecido en diferentes ambientes determinados por la altitud y latitud. Además de esto, el cultivo puede sobrevivir a diversos tipos de estrés y es muy resistente (comparado con otras hortalizas como el tomate por ejemplo *Lycopersicon esculentum*) y aun así producir frutos y semillas viables (criterio de esencialidad), aunque la disminución de la calidad dependerá del tipo de estrés y grado al que haya sido sometido.

Sin embargo ya para la producción comercial en donde el éxito es importante y aparte del rendimiento hay que producir frutos de calidad y una vez que nos salimos de algunos de estas condiciones agroecológicas ideales, empezamos a tener problemas que se traducen en pérdidas para el productor.

Nutrientes esenciales

La planta puede absorber más de 60 elementos, sin embargo los elementos que va a absorber en mayor cantidad son aquellos que requiera y en el orden de importancia que los requiera para cumplir con sus funciones vitales.

Los primeros que va a absorber y en orden de importancia son los elementos esenciales, los cuales son elementos químicos indispensables para el crecimiento y desarrollo de las plantas, es decir sin los cuáles las plantas no pueden llevar a cabo su ciclo de vida normal (incluyendo desde la emergencia hasta la generación de semillas viables, lo cual marca el inicio de una nueva generación).

No todos los elementos son esenciales, se necesita que cumplan con los criterios de esencialidad propuestos en 1939 por D.I. Arnon and P.R. Stout, los cuales son los siguientes:

1. Un elemento es esencial si, al presentarse deficiencia de ese elemento, la planta es incapaz de completar el estado vegetativo o reproductivo de su ciclo de vida.
2. La deficiencia puede prevenirse o corregirse solo con suministrar el elemento específico causante de la deficiencia.
3. El elemento está directamente relacionado en la nutrición de la planta.
4. La “esencialidad” de cualquier elemento se demuestra en todas las plantas analizadas.

En el cuadro 1 se enlistan los elementos esenciales y sus principales características químicas importantes en la nutrición vegetal.

Cuadro 1. Lista de elementos esenciales o nutrientes esenciales para las plantas

Elemento	Peso atómico	Forma absorbida	Rango de concentración en la materia seca
Macronutrientes			
1. Carbono (C)	12.01	CO ₂	45%
2. Oxígeno (O)	16.00	CO ₂ , O ₂	45%
3. Hidrógeno (H)	1.01	H ₂ O	6%
4. Nitrógeno (N)	14.01	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	0.5-6%
5. Fósforo (P)	30.97	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻	0.15-0.5%
6. Potasio (K)	39.10	K ⁺	0.8-8%
7. Calcio (Ca)	40.08	Ca ²⁺	0.1-6%
8. Azufre (S)	32.06	SO ₄ ²⁻	0.1-1.5%
9. Magnesio (Mg)	24.31	Mg ²⁺	0.05-1%
Micronutrientes			
10. Hierro (Fe)	55.85	Fe ²⁺ , Fe ³⁺	20-600 ppm
11. Cloro (Cl)	35.45	Cl ⁻	10-80,000 ppm
12. Manganeso (Mn)	54.94	Mn ²⁺	10-600 ppm
13. Zinc (Zn)	65.38	Zn ²⁺	10-250 ppm
14. Cobre (Cu)	63.54	Cu ⁺ , Cu ²⁺	2-50 ppm
15. Boro (B)	10.81	BO ₃ ³⁻ , H ₃ BO ₃	0.2-800 ppm
16. Molibdeno (Mo)	95.94	MoO ₄ ²⁻	0.1-10 ppm

Tomada de Epstein (1994). La equivalencia de unidades es (1% = 10,000 ppm).

Existen otros elementos o nutrientes que promueven el crecimiento de las plantas, aunque no cumplan completamente los criterios de esencialidad y son denominados elementos benéficos (Sodio (Na), Vanadio (V), Níquel (Ni) y Cobalto (Co)). Estos elementos se consideran benéficos porque son esenciales al menos en algunas especies. Por ejemplo el cobalto es esencial en la fijación de nitrógeno en leguminosas (Salisbury y Ross, 1994).

Nitrógeno

Es un elemento químico cuyo símbolo es N, su peso atómico es 14.01 y su concentración en el tejido seco de las plantas es de 1.5 % aproximadamente. El nitrógeno es un macronutriente, ya que es de los nutrientes que por lo general las plantas requieren en mayor cantidad para poder cumplir con sus funciones biológicas de manera normal. Su función en la planta es estructural, ya que es el constituyente esencial de los aminoácidos, nucleoproteínas y nucleótidos, es esencial para la división y expansión celular y por lo tanto para el crecimiento de las plantas, además cumple con los criterios de esencialidad. El papel del nitrógeno como nutriente esencial y componente estructural de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos y otros constituyentes esenciales para el desarrollo ha sido ampliamente documentado en varias especies debido a la importancia en los procesos de crecimiento y producción agrícola (Colla *et al.*, 2011).

Formas químicas del N en la naturaleza.

En la atmósfera se encuentra en una concentración del 78% aproximadamente, solo que se encuentra en forma de N_2 . En el suelo se encuentra principalmente en forma de (NO_3^-) o amonio (NH_4^+) o de los productos de la desnitrificación que son NO (óxido nítrico), N_2O (Óxido Nitroso) y NO_2 (Nitrito)

Ciclo biogeoquímico del N

En la atmósfera se encuentra en una concentración del 78% aproximadamente, solo que se encuentra en forma de N_2 y de esa manera no es aprovechable por las plantas.

En condiciones adecuadas de temperatura, aireación, humedad y pH del suelo, los organismos del suelo transforman la mayor parte del nitrógeno procedente de fertilizantes, residuos de cosecha y estiércol en nitrato, proceso conocido como nitrificación. Se pueden dar pérdidas de N, ya sea por lixiviación, verticalmente hacia capas más profundas; por volatilización, sobre todo cuando el fertilizante se deja expuesto sobre el suelo y se tienen condiciones de humedad y altas temperaturas o cuando se fija el amonio a las partículas del suelo. El nitrógeno es absorbido por las plantas principalmente en forma del ion nitrato (NO_3^-) o amonio (NH_4^+). Casi todo el

nitrógeno que absorben las plantas se halla en forma de nitrato. En primera por que el nitrato (anión) es móvil en el suelo y se desplaza en el agua hacia las raíces de las plantas, donde es absorbido. Por otra parte el amonio (catión), es fácilmente ligado a la superficie de las partículas del suelo (anión) (Paul, 2007).

Forma más estable del N.

En términos termodinámicos, el nitrógeno gaseoso (N_2) es la forma más estable del nitrógeno. Las otras formas químicas del nitrógeno revierten a N_2 bajo condiciones de equilibrio. Esto explica el hecho de que el nitrógeno molecular es el principal depósito de nitrógeno para los organismos vivos. No obstante, muy pocos organismos tienen la capacidad para fijar el nitrógeno gaseoso. De hecho, solo un reducido grupo de eubacterias (fototróficas y heterotróficas) y arqueobacterias exhibe dicha capacidad. El reciclaje del nitrógeno depende entonces de las transformaciones químicas de compuestos nitrogenados más disponibles, a través de reacciones de oxi-reducción.

Compuestos nitrogenados indicadores de estrés.

En plantas superiores, el papel fisiológico de la acumulación de prolina aún no ha sido completamente determinado, sin embargo se sabe que aparte de actuar como un “osmorregulador”, la acumulación de prolina tiene otras funciones celulares importantes. La prolina puede actuar como una fuente de N en la célula bajo condiciones de estrés, donde la acumulación de este compuesto nitrogenado pudiera ser utilizada como una forma de N almacenado (Colla *et al.*, 2011).

Como resultado de investigación en plantas de frijol ejotero (Sánchez *et al.*, 2016) encontró que la prolina puede ser definida como un buen indicador del estado nutricional de N.

Fuentes de fertilización nitrogenadas

El nitrógeno es uno de los nutrientes más caros para el suministro y los fertilizantes comerciales representan el mayor costo de producción de la planta (Masclaux-Daubresse *et al.*, 2010).

Las principales formas de administrar nitrógeno a las plantas son nitrato (NO_3^-) y amonio (NH_4^+) los cuales afectan el crecimiento, morfología y el status de los nutrientes. El amonio (NH_4^+) es la forma de N más común en los fertilizantes comerciales, por lo que los fertilizantes nitrogenados en riego por gravedad tienen una eficiencia cercana al 60%. La mayoría de las plantas prefieren NO_3^- porque la alta concentración de NH_4^+ es tóxica para su metabolismo. Sin embargo, la adición de un óptimo rango de nitrato y amonio en el contenido de la solución maximiza la absorción y promueve el crecimiento en las plantas, cuando las condiciones de crecimiento son favorables (Hernández-Pérez *et al.*, 2011). Se ha reportado que los niveles bajos de nitrato de amonio y estimulan la nodulación, mientras que altas concentraciones de estos nutrientes inhiben la formación de nódulos (Kraiser *et al.*, 2011).

Fósforo

Importancia biológica del P.

El fósforo es un elemento esencial para la vida, que juega papeles estructurales y funcionales en prácticamente todos los organismos y se encuentra en los componentes celulares como los fosfolípidos, ácidos nucleicos y ADN (Paul, 2007).

Velocidad de absorción del fósforo.

El único nutriente cuya velocidad de absorción es más lenta es el fósforo. La demanda de fósforo se hace más intensa en el período de mayor crecimiento de la raíz y en el momento de la floración. La tasa de absorción diaria es diferente para cada cultivo y para cada nutriente (Castellanos *et al.*, s/f).

El fósforo en la planta.

La proporción de fósforo en la materia vegetal es relativamente pequeña (entre 0.5 y 1%) de la materia seca, pero el papel que desempeña es vital. Como fosfatos se encuentra formando parte de fosfolípidos, fosfoprotéidos y fosfoglicidos. Es componente de los ácidos nucleicos como el ADN, muchas sustancias intermedias en la fotosíntesis y en la respiración celular están combinadas con el fósforo, y los átomos de fósforo proporcionan la base para la formación de los enlaces de alto contenido de energía del ATP. La mayor reserva de fósforo está en la corteza terrestre y en los depósitos de rocas marinas (Navarro y Gines, 2000).

Ciclo del P en el suelo.

El ciclo del fósforo (P) en el suelo es un sistema dinámico y complejo que involucra la acumulación del elemento en: a) la biomasa microbiana, b) la materia orgánica y c) formas inorgánicas. El P en el suelo puede ser fraccionado en compartimentos que varían en su disponibilidad para las plantas y microorganismos. Una fracción pequeña se encuentra en forma soluble, la cual está en equilibrio con la fracción lábil que comprende el P orgánico fácilmente mineralizable y los fosfatos débilmente adsorbidos a las arcillas coloidales. La mayor parte está en formas insolubles o fijadas, principalmente como minerales primarios fosfatados, humus, fosfatos insolubles de Ca, Fe y Al, y fosfatos fijados por los óxidos y minerales silicatados (Picone –Zamuner, 2002).

La forma iónica en que puede ser absorbido es como H_2PO_4^- y HPO_4^{2-} y la forma en que llega a la planta es por intercepción de raíces y los síntomas de deficiencia son: enanismo pero con frecuencia acompañadas de un color verde oscuro o morado por la acumulación de pigmentos del grupo de las antocianinas (Salisbury y Ross, 1994).

Potasio

El potasio (K^+) es uno de los macronutrientes más abundantes en las plantas que puede constar de hasta 10% de la masa seca de la planta. A largo plazo la deficiencia de K^+ reduce la fotosíntesis, crecimiento de las plantas y la tolerancia al estrés. A diferencia de otros nutrientes como el N por ejemplo que es asimilado a aminoácidos y éstos a proteínas, el potasio es absorbido en forma iónica K^+ y así se conserva en la planta, es decir, no forma otros compuestos biológicos (Marschner, 2012).

Movilidad en la planta

Es un ion altamente móvil que actúa como un activador de muchas enzimas celulares, además de que tiene una alta influencia en atributos de calidad como la formación de compuestos bioactivos (ácido ascórbico y beta caroteno).

Calcio

El calcio se absorbe como ion Ca^{2+} divalente. La mayoría de los suelos tienen suficiente Ca^{2+} para permitir un crecimiento vegetal adecuado, aunque los suelos ácidos con lluvias abundantes a menudo se ven fertilizados con limo (una mezcla de CaO y $CaCO_3$) que eleva el pH (Salisbury y Ross, 1994). Ayuda a la actividad enzimática de la planta, es un componente estructural de la pared celular, influye en el movimiento del agua en la célula y es necesario para la división y el crecimiento celular. En algunas plantas, la presencia del calcio es fundamental para la extracción de nitrógeno y otros minerales. El calcio se lixivia con facilidad, pero una vez alojado en los tejidos de la planta es inamovible (no translocable) (Magallanes-Quintanar, 2005) como resultado, los síntomas de deficiencia casi siempre se ven en los tejidos jóvenes.

Magnesio

El magnesio se absorbe como ion divalente Mg^{2+} . En su ausencia, la clorosis en las hojas más antiguas es el primer síntoma. Es un componente estructural en la molécula de clorofila y es necesario para el funcionamiento de las enzimas de la planta que producen carbohidratos, azúcares y grasa. Se utiliza en la formación del fruto y de la semilla y es esencial para la germinación (Salisbury y Ross, 1994; Magallanes-Quintanar, 2005).

Los métodos de diagnóstico

En nutrición vegetal existen dos métodos para hacer un diagnóstico del estado nutrimental de un cultivo, a saber:

Los métodos de diagnóstico pueden ser cualitativos, por observación de los síntomas visibles de alteraciones nutrimentales; o cuantitativos, basados en los resultados de análisis químico de material vegetal, comparado con normas o valores de referencia.

Método cualitativo:

Los síntomas visibles de alteraciones nutrimentales es la primer herramienta disponible para conocer la situación nutricional de una planta y la identificación de los signos de hambre de nutrimentos es un arte que puede llegar a dominarse con la práctica (Castellanos *et al.*, S/F).

Las alteraciones nutrimentales que reducen ligeramente el crecimiento y la producción no producen síntomas visibles claros. Normalmente los síntomas visibles se presentan cuando la deficiencia nutrimental es aguda, así que el ritmo de crecimiento y el rendimiento son disminuidos de forma aguda y significativa. Muchas especies vegetales ajustan su crecimiento al nutrimento limitante, sobre todo las adaptadas a suelos pobres en nutrimentos, con lo que no se desarrollan síntomas visibles (Jones *et al.*, 1991).

Métodos cuantitativos:

Son los que se pueden cuantificar y en la nutrición vegetal, las técnicas más utilizadas para la determinación de las relaciones entre nutrientes y biomasa han sido entre otras:

- Nivel crítico.
- Sistema integrado de diagnóstico y recomendación
- Diagnóstico de nutrimento compuesto o *compositional nutrient diagnosis* (CND) (Gárate y Bonilla, 2000).

Descripción de las técnicas de diagnóstico nutrimental vegetal y términos más usados en nutrición vegetal

Nivel crítico

La técnica del nivel crítico (NC) se fundamenta en la correlación que existe entre el crecimiento y el rendimiento de los cultivos con la composición química del follaje (Gárate y Bonilla, 2001).

Algunos autores definen al valor crítico como la concentración mínima requerida de nutrientes para un máximo crecimiento. Es el método más comúnmente utilizado y se basa en la comparación del nutrimento deseado, obtenido por análisis foliar con un valor de referencia que se denomina nivel crítico y corresponde al 90% del máximo de la cosecha en peso seco (Ríos *et al.*, 2014).

Con este método solo se puede concluir si la concentración de nutriente está o no dentro de un rango suficiente (o sobre el valor crítico) para que la planta muestre su productividad, o si es limitante (Magallanes- Quintanar, 2005).

Sistema integrado de diagnóstico y recomendación (DRIS)

Este sistema consiste en un conjunto integrado de normas, desarrolladas para evaluar el estado nutricional de un cultivo. Evaluar el estado nutricional consiste en realizar una comparación entre una muestra cualquiera y un patrón o estándar de

comparación, el cual ha sido denominado como norma (Rodríguez y Rodríguez, 2000).

El sistema DRIS, genera un conjunto o juego de normas de diagnóstico, a través del censo de contenido de los nutrientes foliares de una subpoblación con los más altos rendimientos. En el caso de este sistema no se ha establecido un procedimiento formal para dividir el total de las observaciones en dos grupos: uno de altos rendimientos y otro de bajos rendimientos (Arroyo-Vargas *et al.*, 2013).

Diagnóstico de nutrimento compuesto o *compositional nutrient diagnosis* (CND)

El método CND fue propuesto por los Parent y Dafir (1992) y se basa en los mismos principios de DRIS, pero su desarrollo matemático es más elaborado y tiene un mayor rigor estadístico. Además, CND considera no sólo las proporciones entre los elementos, sino también las proporciones entre un elemento y todos los demás (Magallanes *et al.*, 2006; Franco-Hermida *et al.*, 2013).

En términos más concisos, los sistemas DRIS y CND se basan en la comparación de los resultados del análisis de tejido de la planta con una norma basada en relaciones de nutrientes. Los resultados de estos métodos de diagnóstico se presentan como índices que cuantifican, en un orden jerárquico, el efecto de cada nutriente en el equilibrio nutricional de los cultivos. Los valores del índice pueden ser positivos (lo que indica un posible exceso de nutrientes) o negativo (es decir, la deficiencia de nutrientes) y se presentan en una escala continua (García *et al.*, 2006; Franco-Hermida *et al.*, 2013).

Importancia del cultivo de chile

Desde el punto de vista genético

México es centro de origen y también el país del mundo con la mayor variedad genética de *Capsicum* (García-Hernández *et al.*, 2004). En el país se conocen cerca de 90 variedades o tipos de *C. annum* (Schweiggert *et al.*, 2006). Aunque sólo cerca de 30 dominan el mercado.

Desde el punto de vista económico

El chile es el 8° cultivo con mayor valor generado en la agricultura nacional, alcanzando aproximadamente 722 millones de dólares. En el año 2012 existían alrededor de 138 mil hectáreas de chile sembradas en México. (FAOSTAT, 2012) debido a que la demanda del chile mexicano en el mercado internacional se ha incrementado (Caro *et al.*, 2014).

El chile jalapeño participa con el 22.8% del valor de producción, bell pepper (15.4%), serrano (8.4%), seco mirasol (7.8%) y ancho (14.1%) (SIAP-SAGARPA, 2014).

Importancia del chile jalapeño en la Comarca Lagunera

En las regiones áridas y semiáridas tales como la Comarca Lagunera es necesario establecer cultivos altamente redituables como el chile jalapeño, que justifiquen la aplicación de tecnología para optimizar el agua de riego y los nutrientes (Inzunza *et al.*, 2010). Al respecto en dicha región se sembraron 596 hectáreas de chile para cosecharse en fresco en el 2014 (*El Siglo de Torreón*, 2015).

Por otro lado, dentro de la gran variedad de tipos de chile que se cultivan en México, el jalapeño es uno de los de mayor importancia económica por su amplio consumo, alta redituabilidad y gran demanda de mano de obra. Uno de los recursos de mayor importancia es la fertilización óptima del cultivo, que proporcione los nutrimentos necesarios para obtener altos rendimientos y buena calidad que cumpla con los requisitos que exige el mercado (Macías *et al.*, 2012) como pungencia y grados Brix.

Propiedades del chile

Además de carotenoides de provitamina A, los chiles son una buena fuente de carotenoides oxigenados o xantofilas, que pueden ser importantes para la prevención de la degeneración macular relacionada con la edad y las cataratas, prevención de enfermedades cardiovasculares, arterioesclerosis y ciertos tipos de cáncer (Seddon *et al.*, 1994).

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

Establecimiento del cultivo

El cultivo fue establecido en campo en el ejido Florencia, Coahuila, México, durante el ciclo primavera-verano de 2013. Dicho ejido está ubicado geográficamente en las coordenadas 25°50'22.32'' (latitud norte) y 103°18'59.11'' (longitud oeste) y a una altitud de 1,107 msnm. En esta región la temperatura media anual es de 22.1 °C, la precipitación pluvial es de 258 mm y la evaporación anual media aproximadamente es 10 veces mayor. En dicha área los suelos son de aluvión, profundos y arcillosos (García-Hernández *et al.*, 2009).

Antes de la siembra se tomaron 10 muestras de suelo en la capa de 0-30 cm del sitio experimental para determinar las características físicas y químicas de éste. El suelo es de tipo migajón arcilloso, alcalino y de baja salinidad. El contenido de MO fue de 1.1 %, pH 8.4, CE 1.46 dS m⁻¹, 17 mg kg⁻¹ de N, 14 mg kg⁻¹ de P, 1.30 meq L⁻¹ de K, 5.4 meq L⁻¹ de Ca y 6.8 meq L⁻¹ de Mg.

Preparación del terreno

Las actividades de preparación del terreno dieron inicio a mediados del mes de enero del 2013, con el barbechado, rastreo y emparejamiento del suelo, así como la formación de bordos con una separación de bordo a bordo de 1.8 m, para el riego se utilizó cintilla y acolchado para evitar la pérdida excesiva de agua debido a las condiciones climáticas del sitio.

Siembra y cuidado de la plántula

La siembra de las semillas se realizó en el invernadero de la FAZ-UJED el 18 de enero de 2013, para ello se utilizaron charolas de poliestireno de 200 cavidades. Como sustrato se utilizó peat moss (70%) y vermiculita (30%), posteriormente se colocó una 1 semilla por cavidad a 0.5 cm de profundidad. Las charolas se regaron diariamente durante en la mañana a las 8:00 am y por la tarde a las 7:00 pm. Se supervisó la germinación de las semillas y el crecimiento de las plántulas, a los 50 días después de la siembra se procedió a su trasplante.

Trasplante en campo

El cultivar que se estableció fue chile tipo jalapeño cv. Autlán. Se trasplantó a 10 cm de profundidad, tratando de no dañar el cepellón. Se utilizó un arreglo espacial en bordos de doble hilera, acolchado plástico negro y riego por goteo. La distancia entre bordos fue de 1.80 m, mientras que entre planta y planta fue de 30 cm, para obtener una densidad de 37,000 plantas ha⁻¹. La nutrición se realizó con fertirriego aplicando 120 y 60 kg ha⁻¹ de N y P, respectivamente.

Labores culturales

Las plagas y enfermedades que se presentaron fueron el picudo del chile (*Anthonomus eugenii*) y cenicilla polvorienta (*Oidiopsis* sp.) y fueron controladas con los productos orgánicos Insecta Plus y PHC - Mil stop plus respectivamente. Ambos son productos con certificado por OMRI (*Organic Materials Review Institute*).

Muestreo y análisis foliar

Muestreo

Del total de la población, la muestra para el cálculo de las normas fue de 100 unidades de muestreo, correspondientes a dos plantas por unidad. Se tomaron siete hojas de cada planta muestreada más otras siete de la planta contigua hacia el norte, teniendo un total de 14 hojas por unidad de muestreo. Las hojas obtenidas se eligieron del tercio medio de la planta y se cortaron con tijeras de podar incluyendo el peciolo. Cada muestra foliar compuesta (mezcla de las 14 hojas en cada caso) fue limpiada con agua destilada, secada a peso constante y analizada para el total (en porcentaje) de N, P, K, Ca y Mg como se describe posteriormente.

Obtención del rendimiento

Los frutos fueron cosechados de la planta cuando cumplieron con los requerimientos de calidad establecidos (color, largo, ancho, grosor de pulpa, entre otros). El 21 de julio del 2013 se llevó a cabo la primera cosecha, cosechándose cada semana y el número de cortes fue de cinco.

En las mismas plantas que se muestrearon se obtuvo el rendimiento de cada unidad de muestreo. El valor total de rendimiento se obtuvo sumando los rendimientos parciales de cinco cosechas o cortes.

Análisis foliar

Los análisis químicos hechos con esas muestras se llevaron a cabo en los laboratorios analíticos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR) en La Paz, B. C. S. El N total fue determinado por el método de Dumas. El fósforo fue analizado por el método de colorimetría con el complejo de azul de fosfo-molibdato (AOAC 1995). K, Ca y Mg fueron estimados por espectrofotometría de absorción atómica, después de una digestión con HNO₃ (Hanton, 1992).

Identificación de normas nutrimentales

En la presente investigación se utilizó la técnica de Diagnóstico de Nutriente Compuesto para generar normas preliminares de nutrición en chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.) debido a que tiene un procedimiento formal para dividir a las observaciones en dos grupos: uno de altos rendimientos y otro de bajos rendimientos. Dicha partición se sustenta en la relación cúbica entre los rendimientos y las funciones de proporción de varianza acumulada, y en la función de distribución de χ^2 de los índices de nutrición global, útiles en el proceso de diagnóstico.

Esta técnica fue descrita inicialmente por Parent y Dafir (1992) y luego retomada por (García-Hernández 2006; 2009) y Magallanes Quintanar (2004; 2005) entre otros autores.

Así entonces, se considera que la composición del tejido vegetal forma un arreglo (S^d) d dimensional de nutrientes, es decir, el tejido está compuesto de d nutrientes y un valor de relleno:

$$S^d = [(N, P, K, \dots, R_d): N > 0, P > 0, K > 0, \dots, R_d > 0, N + P + K + \dots + R_d = 100] \quad (1)$$

donde 100 es la concentración de materia seca (%); N, P, K,... son las proporciones de nutrientes y R_d es el valor de relleno entre 100 % y la suma de las d proporciones de nutrientes estimado mediante:

$$R_d = 100 - (N + P + K + \dots). \quad (2)$$

Esas proporciones se hacen invariantes en escala después de que se dividen por la media geométrica G:

$$G = [N \times P \times K \times \dots \times R_d]^{1/d+1} \quad (3)$$

Posteriormente se determinan los logaritmos de las proporciones centradas para cada nutriente:

$$V_N = \ln\left(\frac{N}{G}\right), V_P = \ln\left(\frac{P}{G}\right), V_K = \ln\left(\frac{K}{G}\right), \dots, V_{R_d} = \ln\left(\frac{R_d}{G}\right) \quad (4)$$

De manera que

$$V_N + V_P + V_K + V_{Ca} + V_{Mg} + \dots + V_{R_d} = 0. \quad (5)$$

Donde V_X es la expresión del logaritmo de la proporción centrada para el nutriente X. Esta operación permite asegurar que las estimaciones se han hecho correctamente. Se debe tomar nota de que estas expresiones son proporciones múltiples, pues involucran a todos los nutrientes considerados y el complemento o relleno es considerado como tal. Por definición, la suma de los componentes de un tejido es 100 %, Ecuación (1) y la suma de los logaritmos de las proporciones centradas de los d nutrientes y del relleno R_d debe ser cero (Ecuación 5).

Selección de la subpoblación con alto rendimiento

En cualquier muestra o población es deseable maximizar el número de casos que inequívocamente sean de la subpoblación de bajo rendimiento (Walworth y Sumner, 1987). Se ha demostrado ampliamente que conforme el rendimiento es mayor, el rango de valores de proporciones bivariadas entre nutrientes es menor (Walworth y Sumner, 1987). Entonces, teóricamente una separación entre rendimientos altos y bajos debería determinarse por funciones de proporción de varianza para índices nutricionales, siguiendo un orden decreciente de rendimiento.

De esta manera, la relación curvilínea entre el nutriente y el rendimiento deberá mostrar un valor de referencia entre las subpoblaciones de rendimientos bajos y

altos, en un punto donde las dos subpoblaciones cambian su concavidad, es decir, su punto de inflexión. La primera derivada de la función de proporción de la varianza acumulada disminuye abajo del punto de inflexión y se incrementa sobre él. Es claro pues que la discriminación entre las subpoblaciones se mejora sobre dicho punto. El valor de rendimiento de referencia en el punto de inflexión es el rendimiento mínimo para separar las dos subpoblaciones.

Para estimar el punto de inflexión se siguieron los siguientes pasos:

a) Se ordenaron las 100 observaciones considerando el rendimiento en orden decreciente. Cada observación consistió de las concentraciones de N, P, K, Ca y Mg (expresadas en % con base a materia seca) y rendimiento ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$).

b) Se estimaron los logaritmos de las proporciones centradas de los nutrientes usando las Ecuaciones 2, 3 y 4.

c) Se usa el procedimiento iterativo de Cate-Nelson (Nelson y Anderson, 1977) para dividir la población, partiendo de que la primera subpoblación de altos rendimientos consistió de las dos primeras observaciones y las restantes conformaron la de bajo rendimiento; después las tres primeras se consideraron de rendimiento alto y el resto de rendimiento bajo. El procedimiento se repitió hasta que las dos observaciones de menor rendimiento formaron un grupo y el resto el otro.

d) Para cada subpoblación obtenida según el paso anterior se estimó la varianza de los V_x . Ello permitió estimar la proporción de varianza para el componente X, $f_i(V_x)$:

$$f_i(V_x) = \frac{\text{Varianza de } V_x \text{ } n_1 \text{ observaciones}}{\text{Varianza de } V_x \text{ } n_2 \text{ observaciones}} \quad (6)$$

donde $f_i(V_x)$ es la función de proporción entre las dos subpoblaciones en la *i*ésima iteración ($i = n_1 - 1$) y V_x es la expresión del logaritmo de la proporción centrada CND para el nutriente X.

e) La función de proporción de varianza acumulada se estima considerando que es la suma de las proporciones de varianza en la *i*ésima iteración desde el principio. La función de proporción de varianza acumulada para una iteración dada es estimada como la proporción de la suma total de proporciones de varianza de todas las iteraciones para comparar la fuerza discriminadora de los V_X entre bajos y altos rendimientos sobre una escala común. La función de proporción de varianza acumulada se estima con la siguiente formula:

$$F_i^C(V_X) = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n_1-1} f_i(V_X)}{\sum_{i=1}^{n_1-3} f_i(V_X)} \right] [100] \quad (7)$$

Donde n_1-1 es el número de partición y n es el número total de observaciones ($n_1 + n_2$). El denominador es la suma de proporciones de todas las iteraciones, y por lo tanto es una constante para el componente X.

f) Entonces, la función de proporción de varianza acumulada $F_i^C(V_X)$ se relaciona con el rendimiento Y , mediante un modelo cúbico:

$$F_i^C(V_X) = aY^3 + bY^2 + cY + d \quad (8)$$

g) Dado que el punto de inflexión es aquel donde el modelo muestra un cambio en concavidad, se estima al obtener la segunda derivada de la Ecuación 8:

$$\frac{dF_i^C(V_X)}{dY} = 3aY^2 + 2bY + C \quad (9)$$

$$\frac{d^2F_i^C(V_X)}{dY^2} = 6aY + 2b \quad (10)$$

Al igualar a cero se obtiene el valor del punto de inflexión ($-b/3a$):

$$Y = -b/3a \quad (11)$$

El valor límite de rendimiento más alto de todas las expresiones de los nutrientes fue seleccionado para averiguar que el rendimiento mínimo asociado a una subpoblación de alto rendimiento será clasificado como un rendimiento alto para cualquier expresión nutrimental.

Los valores medios de V_N , V_P , V_K , V_{Ca} y V_{Mg} y las desviaciones estándar de las observaciones de rendimiento alto son considerados las normas de la técnica de diagnóstico de nutriente compuesto. Se debe confirmar que la suma de los logaritmos de las proporciones centradas debe ser igual a cero, lo cual indica que los cálculos se realizaron adecuadamente. Es recomendable que la base de datos se incremente con más datos para dar mayor validez a las normas, las cuales seguramente se modificarán al incrementar, particularmente, el rendimiento de referencia porque precisamente lo que debe de incrementarse es la subpoblación de altos rendimientos (Parent y Dafir, 1992).

Interacciones nutrimentales

Para la identificación de las interacciones entre los nutrimentos analizados en el tejido vegetal y su relación con el rendimiento del cultivo, se estimaron coeficientes de correlación de Pearson. 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), cuando se analiza la relación entre pares de nutrimentos; mientras que cuando se relaciona algún nutrimento con el rendimiento, es posible evidenciar dependencia de éste con respecto al nutrimento del caso (Blanco-Macías *et al.*, 2006).

Para la generación de las normas preliminares se utilizó el programa Microsoft Excel 2010, mientras que para el cálculo de los coeficientes de Pearson se usó el programa Statistica, versión 9.1 (StatSoft Inc., 2010)

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

RESULTADOS

Normas de Diagnóstico de Nutrimiento Compuesto.

Los valores de la media aritmética del contenido de nutrimentos N, P, K, Ca y Mg en porcentaje fueron 4.57, 0.18, 6.78, 2.46 y 0.66 respectivamente, mientras que la media de rendimiento fue $40.5 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de fruto fresco de chile. El mayor coeficiente de variación se presentó en rendimiento de fruto (31%), mientras que dicho coeficiente de las concentraciones nutrimentales fue en todos los casos menor a 20%. El orden decreciente de extracción de nutrimentos al momento de la floración del presente estudio fue: $K > N > Ca > Mg > P$.

Los seis modelos experimentales entre cada función de proporción de varianza acumulada $:[F_i^C(V_N), F_i^C(V_P), F_i^C(V_K), F_i^C(V_{Ca}), F_i^C(V_{Mg}) \text{ y } F_i^C(V_R)]$ y el rendimiento (Figura 1), se ajustaron a un modelo cúbico (Cuadro 2), mediante el coeficiente de determinación ($R^2 > 0.99$).

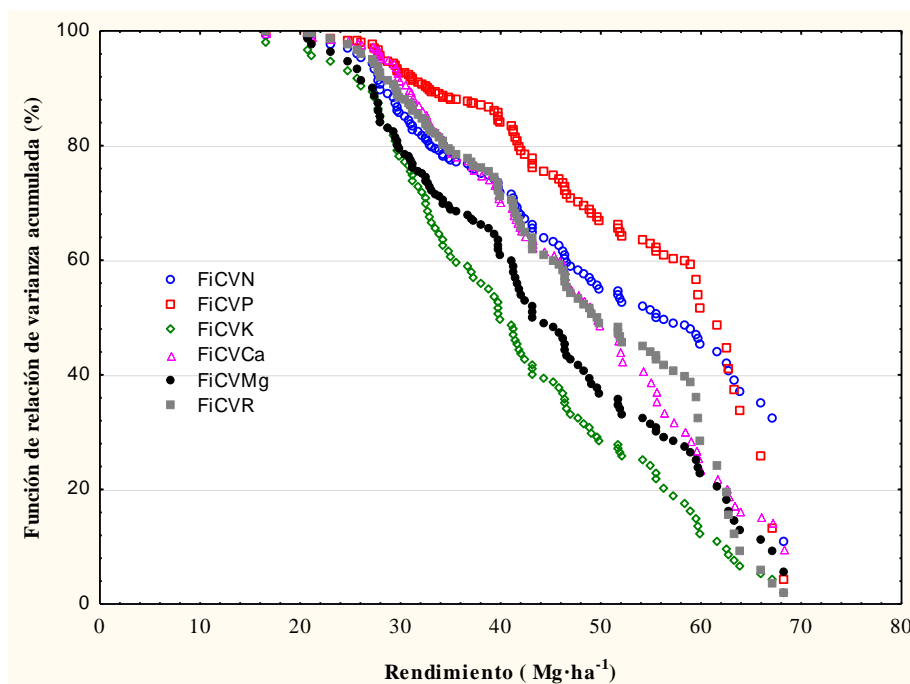


Figura 1. Relación entre el rendimiento de chile jalapeño Autlán y la varianza acumulada en el arreglo S⁵ para estimar el punto de inflexión.

Los valores de rendimiento asociados a los puntos de inflexión fueron 31.33, 32.21, 34.67, 52.09, 42.42 y 37.5 Mg·ha⁻¹ para N, P, K, Ca, Mg y R respectivamente (Cuadro 2).

Cuadro 2. Rendimiento de chile jalapeño cv. Autlán en los puntos de inflexión de las funciones de varianza acumulada de la proporción de logaritmos centrados en la población estudiada (n=100).

Nutrimiento	$F_i^C(Vx) = aY^3 + bY^2 + cY + d$	R ²	Rendimiento
N	$y = -0.00005x^3 + 0.0047x^2 - 1.5773x + 130.22$	0.976	31.33
P	$Y = -0.0008x^3 + 0.0733x^2 - 3.01395x + 138.56$	0.971	32.21
K	$y = 0.0008x^3 - 0.0832x^2 + 0.4197x + 118.13$	0.990	34.67
Ca	$y = 0.0007x^3 - 0.1094x^2 + 2.9799x + 79.307$	0.996	52.09
Mg	$y = 0.0004x^3 - 0.0509x^2 - 0.1034x + 117.86$	0.992	42.42
R	$y = -0.00008x^3 - 0.009x^2 - 0.7007x + 119.35$	0.987	37.5

Rendimiento = Mg·ha⁻¹.

La teoría del método indica que es recomendable considerar al valor de rendimiento mayor para ser usado como referencia con el fin de separar a las observaciones en dos subpoblaciones, una de alto y otra de bajo rendimiento. En el presente caso, el valor crítico que se decidió tomar como rendimiento de referencia fue $52.09 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, asociado al punto de inflexión del modelo cúbico ajustado correspondiente al Ca.

En el Cuadro 2a se muestran las normas preliminares de DNC como medias y desviaciones estándar (V_x^* y DE de V_x^* respectivamente) para el cultivar de chile jalapeño Autlán en un suelo calcáreo semidesértico. También se muestran los rangos de concentración óptima correspondientes a cada nutrimento.

Cuadro 2a. Normas preliminares (Media V_x y DE de las V_x) de DNC para $d = 5$ nutrimentos y rangos de concentración óptimos (Media y desviación estándar, DE) en chile jalapeño con un rendimiento de referencia de $52.09 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$.

Relaciones logarítmicas centradas	Media V_x	DE V_x	Nutrimento	Media (%)	DE (%)
V_N^*	0.42	0.06	N	4.57	0.25
V_P^*	-2.83	0.17	P	0.18	0.03
V_K^*	0.81	0.11	K	6.80	1.04
V_{Ca}^*	-0.20	0.06	Ca	2.46	0.17
V_{Mg}^*	-1.54	0.11	Mg	0.64	0.07
$V_{R_5}^*$	3.35	0.07	R	85.34	1.24
ΣV_X	0	-			

Los índices nutrimentales de DNC: I_N , I_P , I_K , I_{Ca} , I_{Mg} , y I_{Rd} y de desbalance (DNC r^2) fueron obtenidos a partir de las normas preliminares de DNC y los valores de (DNC r^2) tuvieron una distribución de χ^2 con valores ($R^2 > 0.999$; $p < 0.001$) (Figura 2).

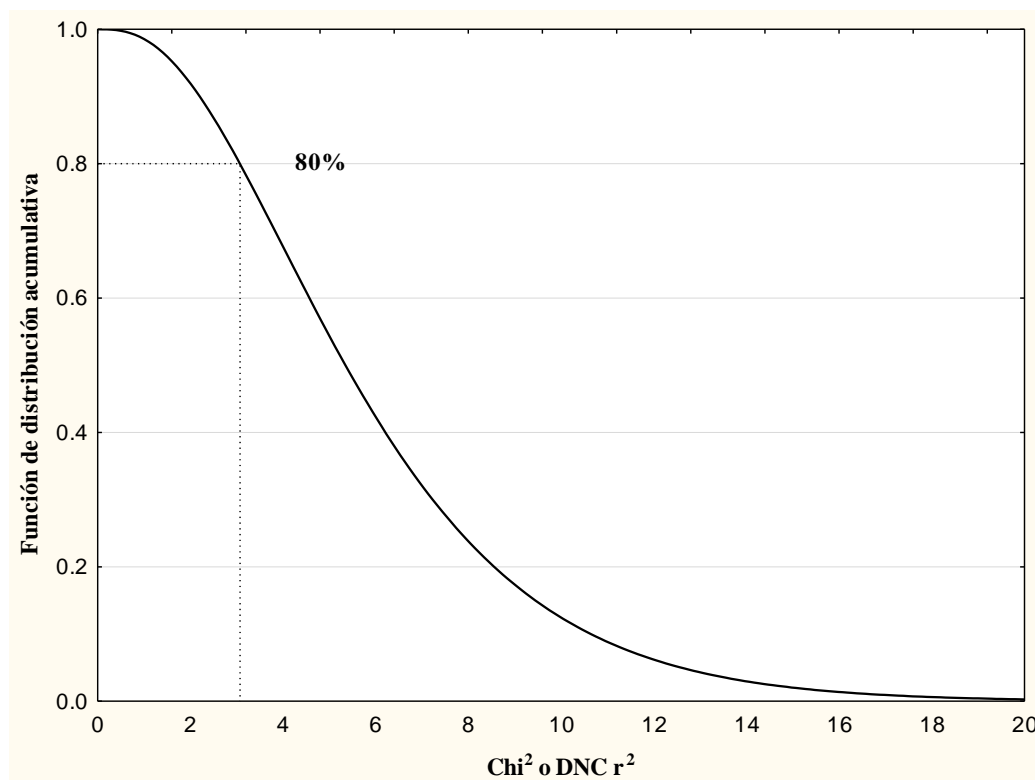


Figura 2. Función de distribución acumulada de χ^2 con seis grados de libertad para obtener el valor crítico teórico de (DNC r^2) en el arreglo S^5 (3.2) asociado al 80 % de la población (subpoblación de bajo rendimiento).

Correlaciones entre nutrientes y rendimiento.

Al calcular la matriz de correlaciones de la población completa se obtiene una idea general del grado en que el rendimiento depende de los nutrientes (Cuadro 3). También muestra las correlaciones significativas ($p \leq 0.05$) entre los nutrientes analizados. Por medio de este análisis se pudo saber que el rendimiento no es dependiente de manera significativa ($p \leq 0.05$) de ninguno de los nutrientes. Por otro lado, las correlaciones nutrimentales significativas entre N y P ($r = 0.468$), N y K ($r = 0.361$); P y K ($r = 0.218$) y la correlación Ca y Mg ($r = 0.417$) fueron positivas, es decir cuando una aumenta, la otra también lo hace.

Cuadro 3. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson (r), entre rendimiento (Mg·ha⁻¹) y concentración de nutrimentos (%) en la población completa (n=100)

Variable	Rendimie	Nitróg	Fósfo	Potas	Calci	Magne
Nitrógen	0.038 p=0.711					
Fósforo	-0.024 p=0.811	0.468 p=0.00				
Potasio	-0.032 p=0.749	0.361 p=0.00	0.218 p=0.0			
Calcio	0.062 p=0.542	-0.024 p=0.81	-0.033 p=0.7	0.123 p=0.2		
Magnesi	-0.152 p=0.130	-0.099 p=0.32	-0.192 p=0.0	0.067 p=0.5	0.417 p=0.0	
R	0.014 p=0.893	-0.561 p=0.00	-0.309 p=0.0	-0.934 p=0.0	- p=0.0	-0.190 p=0.05

Coefficientes de correlación de Pearson (r) significativos a $p < 0.05$ con negritas.

Ninguno de los nutrimentos se relacionó más significativamente que los demás respecto al rendimiento. Este resultado no es común en este tipo de estudios y por ello nos lleva a reflexionar si se logró un nivel de fertilidad más balanceados que en los experimentos anteriores.

Al respecto, se conoce que cada uno de los elementos tiene una función esencial en los procesos bioquímicos de la planta y por lo tanto con la productividad de ésta. Para confirmar este supuesto otras dos matrices de coeficientes de correlación de Pearson entre el rendimiento y los nutrimentos se realizaron: una al considerar la subpoblación de altos rendimientos y otra la de bajos rendimientos.

Al realizar la matriz de correlaciones para la sub-población de altos rendimientos (Cuadro 4) se obtuvo que el rendimiento dependió de manera significativa ($p \leq 0.05$) del P ($r = 0.494$). También se obtuvo una correlación positiva entre Ca y Mg ($r = 0.483$).

Cuadro 4. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson (r), entre la sub-población de altos rendimientos ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) consistente de 20 observaciones y concentración de nutrientes (%) en tejido vegetal de chile jalapeño Autlán.

Variable	Rendimiento	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Calcio	Magnesio
Nitrógeno	0.026 p=0.913					
Fósforo	0.494 p=0.027	0.236 p=0.316				
Potasio	-0.164 p=0.490	0.4185 p=0.066	0.215 p=0.363			
Calcio	-0.140 p=0.557	-0.002 p=0.995	0.226 p=0.339	0.216 p=0.359		
Magnesio	-0.300 p=0.199	-0.125 p=0.599	-0.254 p=0.280	0.339 p=0.144	0.483 p=0.031	
R	0.157 p=0.509	-0.5486 p=0.012	-0.267 p=0.256	-0.974 p=0.000	-0.351 p=0.129	-0.377 p=0.101

Coefficientes de correlación de Pearson (r) significativos a $p < 0.05$ con negritas.

Para la subpoblación de bajos rendimientos (Cuadro 5) se presentó correlación positiva ($p < 0.05$) entre N y P ($r = 0.505$), N y K ($r = 0.355$), P y K ($r = 0.222$), y también entre Ca y Mg ($r = 0.416$).

Cuadro 5. Matriz de coeficientes de correlación de Pearson (r), entre la sub-población de bajos rendimientos (Mg ha^{-1}) y concentración de nutrimentos (%) en tejido vegetal de chile jalapeño Autlán.

Variable	Rendimiento	Nitrógeno	Fósforo	Potasio	Calcio	Magnesio
Nitrógeno	0.064 p=0.570					
Fósforo	-0.069 p=0.545	0.505 p=0.000				
Potasio	-0.049 p=0.667	0.355 p=0.001	0.222 p=0.048			
Calcio	0.102 p=0.366	-0.026 p=0.817	-0.065 p=0.566	0.111 p=0.327		
Magnesio	-0.070 p=0.538	-0.091 p=0.424	-0.182 p=0.107	0.008 p=0.945	0.416 p=.000	
R	0.002 p=0.988	-0.570 p=0.000	-0.321 p=0.004	-0.923 p=0.00	-0.359 p=0.001	-0.155 p=0.170

Coefficientes de correlación de Pearson (r) significativos a $p < 0.05$ con negritas.

Al analizar las tres matrices de correlaciones, se deduce que en las matrices de la base de datos completa y en la de bajos rendimientos ninguno de los nutrientes se correlacionó de manera significativa con el rendimiento. Mientras que en la matriz correspondiente a altos rendimientos, una correlación positiva significativa entre P y rendimiento fue evidenciada.

DISCUSIÓN

Normas de Diagnóstico de Nutrimento Compuesto

Al tomar como referencia el valor crítico de rendimiento de $52.09 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para definir la subpoblación de alto rendimiento, ésta corresponde a 20 observaciones que equivalen al 20 % de la población, mientras que la subpoblación de bajo rendimiento contempla a 80 observaciones que corresponden al 80 % de la población. En este caso, aunque se presenta una sub-población de alto rendimiento menor a los encontrados por Khiari *et al.* (2001) en los trabajos pioneros en esta metodología con 32.5 %, es posible que sea más confiable, pues el presente estudio se basa en una población total 250 % mayor. La tendencia observada en el presente estudio, coincide con las tendencias encontradas por Valdez-Cepeda *et al.* (2013) en donde al aumentar el número de observaciones en la población total tiende a disminuir el porcentaje de observaciones correspondientes a la subpoblación de alto rendimiento.

Los valores encontrados en el presente estudio para las normas nutrimentales y concentraciones óptimas de nutrimentos sugieren algunas diferencias entre el cultivar de chile jalapeño Autlán (Cuadro 2a) y otros cultivares del género *Capsicum* que han sido estudiados anteriormente (García-Hernández *et al.*, 2004; 2006). Sin embargo, también se observan muchas similitudes. Lo que sí es más evidente son las diferencias en las concentraciones y la composición respecto a las encontradas en otros tipos de plantas donde también se han calculado este tipo de normas, por ejemplo, en crasuláceas como la sábila (*Aloe vera*) (García-Hernández *et al.*, 2006) y el nopal (*Opuntia ficus-indica*) (Magallanes-Quintanar *et al.*, 2004). Valores detallados de estas diferencias se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Concentraciones nutrimentales óptimas citadas en la literatura para diferentes especies y/o tipos del género *Capsicum* y para algunas crasuláceas.

Nutrimento	<i>C. annum</i> ¶	<i>C. annum</i> tipo güero *	<i>C. annum</i> 'pimiento' ‡	Sábila (<i>Aloe</i> <i>vera</i>) £	Nopal (<i>Opuntia</i> <i>ficus-indica</i>) €
N (%)	4.0 – 5.0	4.23– 4.83	4.26 – 4.92	0.75 – 0.88	0.92 – 1.03
P (%)	0.30 – 0.50	0.30– 0.35	0.37 – 0.46	0.15 – 0.19	0.30 – 0.33
K (%)	2.50 – 5.0	3.96– 4.46	4.36 – 5.58	1.94 – 2.54	3.95 – 4.99
Ca (%)	0.90 – 1.50	2.54 – 2.88	1.77 – 2.23	4.25 – 4.81	4.14 – 4.60
Mg (%)	0.30 – 0.60	0.64– 0.71	0.60 – 0.72	1.05 – 1.22	1.35 – 1.59

¶ Hochmuth (1997); *García-Hernández et al. (2004); ‡ Arroyo-Vargas et al. (2013); £ García-Hernández et al. (2006); € Magallanes-Quintanar et al. (2004). Para la elaboración del presente cuadro, se tomó el promedio de concentración obtenido en el artículo original ± 0.5 de la DE.

Por ejemplo: en *C. annum*, Hochmuth (1997) ha reportado concentraciones óptimas de 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 %. En el presente trabajo, el P presentó menor concentración promedio con 0.18 %. Posiblemente esto se deba a que los contenidos de Ca en el suelo son altos y el pH alcalino, por lo tanto, la disponibilidad de P para los cultivos está limitada debido a la baja solubilidad del mineral en este intervalo de pH (Johnson *et al.*, 2003).

En el caso de los nutrimentos K, Ca y Mg (Cuadro 2a) presentaron concentraciones mayores a las encontradas por Hochmuth (1997), mientras que el N fue el único nutrimento que estuvo dentro de los rangos reportados por dicho investigador (4.57 %) el cual está entre 4 y 5%. Por otro lado, García-Hernández *et al.* (2004) en cultivo de chile güero establecido en suelos calcáreos desérticos (con características similares a los del presente estudio) ha reportado concentraciones promedio óptimas en % de: 4.52, 0.32, 4.20, 2.71 y 0.67 de N, P, K, Ca y Mg. Dichas concentraciones se acercan más a las del presente trabajo, lo cual aunado a lo anterior permite concluir que al igual que el chile güero las plantas de chile jalapeño cultivadas en este tipo de suelos, tienden a extraer mayores cantidades de Ca y Mg que las consideradas como óptimas en otras condiciones edáficas.

En el presente estudio (Cuadro 2a) se puede observar que en el género *Capsicum* (que es una planta C_3) el orden decreciente de concentraciones óptimas es: $K > N > Ca > Mg > P$, lo cual coincide con lo encontrado por Azofeifa y Moreira (2008) en cada tejido y en toda la planta de chile jalapeño establecido en campo en Alajuela, Costa Rica. La misma tendencia fue obtenida por Arroyo-Vargas *et al.* (2013) en hoja de chile pimiento morrón establecido en invernadero en Texcoco-México. Por otro lado en plantas CAM como la sábila, el orden encontrado fue $Ca > K > Mg > N$ y P (García- Hernández *et al.* 2006) al igual que en nopal (Magallanes-Quintanar *et al.*, 2004) (Cuadro 3). Esto debido a que en el colénquima de los cactus cultivados y agaves (plantas CAM), los niveles de Ca y Mg tienden a ser más altos que en la mayoría de las plantas de interés agronómico, por lo tanto *Aloe vera* puede ser considerada como una especie calcio trópica (García-Hernández *et al.*, 2006). Al respecto, ha sido reportado que el calcio controla la función de las acuaporinas, las cuales a su vez regulan la entrada de agua a través de membranas biológicas y controla la apertura estomática (Allen *et al.*, 2001).

El 80% de la función de distribución de varianza acumulada de DNC r^2 asociado a un valor crítico de 3.1 (Figura 2), fue seleccionado para calificar a un grupo de plantas como la subpoblación de alto rendimiento. Dicho valor crítico debe ser considerado en la validación de las normas de DNC, ya que cada base de datos independiente debe estar caracterizada teóricamente por un valor similar (Khiari *et al.*, 2001).

Correlaciones entre nutrimentos y rendimiento.

Las interacciones positivas o sinergismos P con K y Ca con Mg fueron las más consistentes y también se han reportado en el cultivo de sábila en este mismo tipo de suelos (García- Hernández *et al.*, 2006).

En este sentido para cultivos de chile, también se han demostrado correlaciones positivas entre N y P al igual que en presente estudio. Por ejemplo en García-Hernández *et al.* (2004) quien ha reportado tendencias similares. Al respecto, Córdova-Sánchez *et al.* (2013) reitera que N es uno de los nutrimentos más

importantes para las plantas, ya que es parte fundamental de proteínas, aminoácidos y de la clorofila y por lo tanto de los que más influyen en la obtención de altos rendimientos y por ende un cultivo exitoso. Además la asociación positiva entre N y P es la tendencia más sorprendente y consistente estadísticamente al considerar una gran diversidad de grupos taxonómicos y especies (Arroyo-Vargas *et al.*, 2013).

Al analizar las tres matrices de correlaciones se encuentra que el fósforo fue el nutrimento que más favoreció la obtención de altos rendimientos en este cultivar. Por otro lado, Arroyo-Vargas *et al.* (2013) en chile pimienta morrón en invernadero ha encontrado correlaciones significativas entre el rendimiento y P y entre el rendimiento y N pero en sentido negativo; es decir, como nutrimentos limitantes. Esto evidencia la importancia de estos dos macro nutrimentos en el cultivo de chile de diferentes tipos.

La única interacción que se presentó en las tres matrices de correlaciones fue Ca y Mg y fue positiva, lo cual sugiere el sinergismo entre estos dos nutrimentos para el caso de chile jalapeño cultivado en suelos calcáreos semi-desérticos y viene a reforzar lo encontrado en chile güero y en sábila en este mismo tipo de suelos (García-Hernández *et al.*, 2004; 2006). Dentro de las interacciones negativas, la que se presentó en todos los casos fue la interacción R con la mayoría de los nutrimentos, lo cual es lógico y sigue la misma tendencia que lo encontrado por Arroyo-Vargas *et al.* (2013) pues al aumentar las concentraciones de los nutrimentos analizados, disminuye la concentración de los no analizados denominados por R en el caso de DNC.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

Las normas preliminares de diagnóstico de nutrimento compuesto, tomando como referencia un rendimiento mayor a 52.09 Mg ha^{-1} , se asocian a la siguiente composición foliar óptima en porcentaje (%): $N = 4.57 \pm .25$, $P = 0.18 \pm 0.03$, $K = 6.80 \pm 1.04$, $Ca = 2.46 \pm 0.17$ y $Mg = 0.64 \pm 0.07$. En general el orden decreciente de extracción de nutrimentos al momento de la floración del presente estudio fue: $K > N > Ca > Mg > P$, el cual sigue un patrón muy similar en el cultivo de chile, pero difiere notoriamente de otras especies como las crasuláceas. Sin embargo el desarrollo de esta investigación fue muy importante, ya que permitió el análisis acerca de cuáles nutrimentos requiere la planta en mayor proporción (en este caso el K y N), los cuales también son necesarios en otros tipos de cultivos muy diferentes como las crasuláceas, debido a la función que desempeñan en el mantenimiento del potencial osmótico y actividad enzimática, así como en la formación de aminoácidos, constituyente esencial de las proteínas.

Respecto a las correlaciones nutrimentales, el fósforo fue el nutrimento que más favoreció la obtención de altos rendimientos en este cultivar, lo cual coincide con otros autores quienes han encontrado significancia entre el P y el N respecto al rendimiento en diferentes genotipos de chile.

Es importante el conocimiento de las funciones que desempeña cada nutriente en la planta para poder relacionarla con la aportación de nutrientes que debemos hacer al cultivo por medio de la fertilización para lograr altos rendimientos pero sin sobrefertilizar ni limitar ningún nutrimento.

El estudio de la nutrición vegetal promueve un conocimiento y comprensión de los procesos fisiológicos, bioquímicos y moleculares que ocurren en la planta para tener un adecuado suministro de nutrientes que le permita concretar su ciclo de vida exitoso (crecimiento, desarrollo y reproducción) y con el uso óptimo de los recursos para tratar de contaminar lo menos posible el ambiente.

LITERATURA CITADA

- A.O.A.C. 1995. Official methods of analysis of AOAC International. 16th edition. Arlington, VA, USA, Association of Analytical Communities.
- Allen G., J., S Chu P., C Harrington L., K. Schumacher, T. Hoffmann, Y. Tang Y. 2001. A defined range of guard cell calcium oscillation parameters encodes stomatal movements. *Nature* 411: 1053-1057.
- Arroyo-Vargas L., J. L. Tirado-Torres, V. H. Volke-Haller y R. D. Valdez-Cepeda. 2013. Normas preliminares de diagnóstico de nutrimento compuesto y correlaciones entre nutrimentos y rendimiento en pimiento (*Capsicum annuum* L.). *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 16(1): 69-82.
- Azofeifa Á. & Moreira M. A. 2005. Absorción y distribución de nutrimentos en plantas de chile dulce (*Capsicum annuum* cv. UCR 589) en Alajuela, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(1): 77-84.
- Azofeifa A. y Moreira M. A. 2008. Absorción y distribución de nutrimentos en plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L. cv. hot) en Alajuela, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 32(1): 19-29.
- Bates T., E. 1971. Factors affecting critical nutrient concentrations in plants and their evaluation: a review. *Soil Science* 112:116-130.
- Bertsch F. 2005. Estudios de absorción de nutrientes como apoyo a las recomendaciones de fertilización. *Informaciones agronómicas*, No. 57: 1-5.
- 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.
- Bortolotti M. 2013. Red Pepper: from the Kitchen to the Pharmacy. *Journal of Gastrointestinal and Liver Diseases* 22(3): 253-256.
- Bosland P., W. 2010. An American in Spain .In: *Advances in Genetics and Breeding of Capsicum and Eggplant*. Prohens J, Rodríguez-Burruezo A (eds.). Valencia, Spain. pp : 21-29.
- Caro E., M., C. Leyva M. y J. Ríos. S. 2014. Competitividad mundial de la producción de chile verde de México. *Revista de Economía* 31(83): 95-128.
- Castellanos J., Z., J. X. Uvalle B. y S. A. Aguilar. S/F. *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. Segunda Edición. Pp. 201.
- Chuah A., M., C. Lee Y., T. Yamaguchi, H. Takamura, J Yin L., T. Matoba 2008. Effect of cooking on the antioxidant properties of coloured peppers. *Food Chemistry* 111: 20-28.

- Colla G., R., Y., C. Mirabelli, M. Cardarelli. 2011. Nitrogen-use efficiency traits of mini-watermelon in response to grafting and nitrogen-fertilization doses. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 174(6): 933-941.
- Córdova-Sánchez S., M. Castelán-Estrada, R. Cárdenas-Navarro, C. Lobbit-Phellipe, J. J. Peña-Cabriales, J. A. Vera-Núñez. 2013. Fijación biológica de nitrógeno por cuatro fabáceas en suelos ácidos de Tabasco, México. *Rev. FCA Uncuyo* 45(1): 1-9.
- Delgado J., A., M. Groffman P., M. Nearing A., T. Goddard, D. Reicosky, R. Lal. 2011. Conservation practices to mitigate and adapt to climate change. *Journal of Soil and Water Conservation* 66(4): 118-129.
- El siglo de Torreón. 2015. *Resumen Económico Comarca Lagunera 2014*. Torreón, Coah., México. 1 de enero de 2015. pp.24.
- Epstein E. 1994. Review: The anomaly of silicon in plant biology. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 91:11-17.
- FAOSTAT. 2016. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Modulo producción. [http:// faostat.fao.org/site/339/default.aspx](http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx). Fecha de consulta 19 de febrero de 2016.
- FAOSTAT. 2012. Statistical Databases. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Franco-Hermida J., J., M. C. Henao T., M. Guzmán y R. I. Cabrera. 2013. Determining Nutrient Diagnostic Norms for Greenhouse Roses. *Hortscience* 48(11):1403–1410.
- Gárate, A. e I. Bonilla. 2000. Nutrición mineral y producción vegetal. En: Azcón-Bieto, J. y Talón, M. *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Ed. McGraw-Hill e Interamericana de España, S.A.U. y Edicions Universitat de Barcelona. Madrid, España. Pp. 113-130.
- García-Hernández J., L., I. Orona-Castillo, G. González C., R. D Valdez-Cepeda, B. Murillo-Amador, E. Troyo-Diéquez. 2009. Nutrient interactions and compositional nutrient diagnosis norms in pecan tree (*Carya illinoensis*). *Revista Chapingo-Serie Horticultura* 15(2): 141-147.
- García-Hernández J., L., R. D. Valdez-Cepeda, B. Murillo-Amador, A. Nieto, L.F. Beltrán-Morales, R. Magallanes, E. Troyo-Diéquez. 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., R. D. Valdez-Cepeda, B. Murillo-Amador, L. F. Beltrán-Morales, F. Ruiz, I. Orona-Castillo. 2006. Preliminary compositional nutrient diagnosis norms in *Aloe vera* L. grown on calcareous soil in an arid environment. *Environmental and Experimental Botany* 58: 244-252.

- García-Hernández J., L., R. D. Valdez-Cepeda, R. Servín-Villegas, E. Troyo-Diéguez, B. Murillo-Amador, E. O. Rueda-Puente, J. C. Rodríguez-Ortiz, R. Magallanes-Quintanar. 2007. Interacciones nutrimentales y normas de diagnóstico de nutrimento compuesto en una variedad semidomesticada de *Capsicum frutescens*. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 13(2): 133-140.
- González-Zamora A., E. Sierra, J. G. Luna, R. Pérez, J. C. Rodríguez, García-Hernández J., L. 2013. Characterization of different *Capsicum* varieties by evaluation of their capsaicinoids content by high performance liquid chromatography, determination of pungency and effect of high temperature. *Molecules* 18: 13471-13486.
- González-Zamora A., E. Sierra, R. Pérez, C. Vázquez V., M. A. Gallegos R., J. D. López M., García-Hernández J. L. 2015. Measurement of capsaicinoids in chiltepin hot pepper: a comparison study between spectrophotometric method and high performance liquid chromatography analysis. *Journal of Chemistry* 2015: 1-10.
- Grodzinski, B., J. Jirong and L. Evangelos D. 1998. Estimating Photosynthesis and Concurrent Export Rates in C₃ and C₄ Species at Ambient and Elevated CO₂. *Plant Physiology* 117: 207-215.
- Hernández-Pérez A., O. G. Villegas-Torres, M. L. Domínguez-Patiño, H. Sotelo-Nava, A. Rodríguez-Martínez, L. A. Valdez-Aguilar e I. Alía-Tejacal. 2014. Nitrogen/Ammonium Concentration Response of Vegetable and Flower Crops. *Journal of Agricultural Science and Technology* 4: 261-266.
- Hanton E., A. 1992. Determination of Potassium, Calcium, and Magnesium in Plants by Atomic Absorption Techniques. *Plant Anal. Ref. Proc. for S. US* (368): 30-33.
- Hochmuth G., J. 1997. *Pepper Production Guide for Florida*. Commercial Vegetable Guide Series. University of Florida, Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, Gainesville, FL, USA.
- Inzunza-Ibarra M., A., M. Villa-Castorena, E. A. Catalán-Valencia, A. Román-López. 2010. Extracción de nutrientes y producción de chile jalapeño bajo acolchado plástico y niveles de riego. *Terra Latinoamericana* 28 (3): 211-218.
- Johnson P., G., T. Koenig R. and L. Kopp K. 2003. Nitrogen, phosphorus, and potassium responses and requirements in calcareous sand greens. *Agronomy Journal* 95: 697-702.
- Jones J., B., B. Wolf, and A. Mills H. 1991. *Plant Analysis Handbook*. Methods of Plant Analysis and Interpretation. Micro-Macro Publishing Athens, GA, USA.
- Khiari L., Parent L., E., N. Tremblay. 2001. Selecting the high-yield subpopulation for diagnosing nutrient imbalance in crops. *Agronomy Journal* 93: 802-808.
- Kraiser T., D. E. Gras, A. G. Gutiérrez, B. González and R. A. Gutiérrez. 2011. A holistic view of nitrogen acquisition in plants. *Journal of Experimental Botany*. 2(4): 1455-1466.

- Macías-Duarte R., R. L. Grijalva C. y F. Robles C. 2012. Respuesta de la aplicación de estiércol y fertilizantes sobre el rendimiento y calidad del chile jalapeño. *Biotecnia* 16(3): 32-38.
- Magallanes-Quintanar R., R. D. Valdez-Cepeda, E. Olivares, O. Pérez V., J.L. García-Hernández, J.D. López M. 2006. Compositional nutrient diagnosis in maize grown in calcareous soil. *Journal of Plant Nutrition* 29: 2019-2033.
- Magallanes-Quintanar R., R. D. Valdez-Cepeda, F. Blanco-Macías, M. Márquez M., R. R. Ruíz G., O. Pérez V. 2004. Compositional nutrient diagnosis in nopal (*Opuntia ficus-indica*). *Journal of Professional Association for Cactus Development* 6: 78-89.
- Magallanes-Quintanar, R. 2005. Generación de normas preliminares mediante la técnica de diagnóstico de nutriente compuesto en la nutrición vegetal. Tesis de doctorado. Universidad Autónoma de Zacatecas. El Cordovel, Enrique Estrada, Zacatecas. Pp. 139.
- Marschner P. 2012. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Third Edition. Edited by Petra Marschner. Elsevier, London, UK. pp 651.
- Masclaux-Daubresse C., F. D. Vedele, J. Dechorgnat, F. Chardon, L. Gaufichon and A. Suzuki. 2010. Nitrogen uptake, assimilation and remobilization in plants: challenges for sustainable and productive agriculture. *Annals of Botany* 105: 1141–1157.
- Mateos R., M., A Jiménez, P. Román, F. Romojaro, S. Bacarizo, and M. Leterrier. 2013. Antioxidant Systems from Pepper (*Capsicum annuum* L.): Involvement in the Response to Temperature Changes in Ripe Fruits. *International Journal of Molecular Sciences* 14(5): 9556–9580.
- Navarro B., S. y N. Gines G. 2000. *Química agrícola*. España. Pp. 234-248.
- Nelson L., A. and L. Anderson R. 1977. *Partitioning of soil test-crop response probability*. p. 19–38. In: M. Stelly (ed.) *Soil testing: Correlating and interpreting the analytical results*. ASA Spec. Publ. 29. ASA, Madison, WI.
- Parent L., E., M. Dafir. 1992. A theoretical concept of compositional nutrient diagnosis. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 117: 239-242.
- Paul E., A. 2007. *Soil Microbiology and Biochemistry*. Third edition. Elsevier. Pp. 391-400.
- Picone L., I. and E. Zamuner. 2002. Fósforo orgánico y fertilidad fosfórica. INPOFOS Simposio de Fósforo: “Enfoque sistémico de la Fertilización Fosfórica”. In: *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, Num. 16. Dic. Facultad Ciencias Agrarias (UNMP)-EEA INTA. Balcarce, Buenos Aires, Argentina. Pp. 1-5.
- Revilla G. e I. Zarra. 2000. La fisiología vegetal y su impacto social. la célula vegetal. En: Azcón-Bieto, J. y Talón, M. *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Ed. McGraw-

- Hill e Interamericana de España, S.A.U. y Edicions Universitat de Barcelona. Madrid, España. Pp. 1-17.
- Ríos-Plaza J., L., J. L. García-Hernández, P. Cano-Ríos, R. D. Valdez-Cepeda, P. Preciado-Rangel. 2015. Importancia del análisis foliar y su relación al diagnóstico nutrimental de los cultivos. En: *Nutrición mineral de las plantas, agricultura sustentable y protegida*. NUVE. Granada, España. Pp. 200-230.
- Rodríguez O. y V. Rodríguez. 2000. Desarrollo, determinación e interpretación de normas DRIS para el diagnóstico nutricional en plantas. Una revisión. *Revista de la Facultad de Agronomía* 17: 449-470.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación)-SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2014. México. Página web: <http://siap.gob.mx>.
- Salisbury F., B. y C. Ross W. 1994. *Fisiología vegetal*. Grupo Editorial Iberoamérica. Pp. 754.
- Sánchez E., M. Ruiz J. y L. Romero. 2016. Compuestos nitrogenados indicadores de estrés en respuesta a las dosis tóxicas y deficientes de Nitrógeno en frijol ejotero. *Nova Scientia*. 16 (8):228-244.
- Sánchez-Chávez E., P. Preciado-Rangel, L. Romero-Monreal, J. L. García-Hernández, J.M. Soto-Parra, M. L. García-Bañuelos. 2014. *Nutrición Mineral de las Plantas: Nuevos retos en la producción, calidad alimentaria y sustentabilidad*. pp. 469.
- Sánchez-Díaz M. y J. Aguirreolea. 2001. El agua en la planta. En: Azcón-Bieto, J. y Talón, M. *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. Ed. McGraw-Hill e Interamericana de España, S.A.U. y Edicions Universitat de Barcelona. Madrid, España. Pp. 17-31.
- Sancho V., H. 2005. Curvas de absorción de nutrientes: importancia y uso en los programas de fertilización. *Informaciones agronómicas* 36: 11-13.
- Schweiggert U., R. Carle and A. Schieber. 2006. Characterization of major and minor capsaicinoids and related compounds in chili pods (*Capsicum frutescens* L.) by high-performance liquid chromatography/atmospheric pressure chemical ionization mass spectrometry. *Analytica Chimica Acta* 557(1):236-244.
- Seddon J., M., A. Ajani, U., D. Sperduto, R., R. Hiller, N Blair, C. Burton, T., D. Farber M., S. Gragoudas, E., J. Haller, T. Miller, D., A. Yannuzzi, L. y W. Willet. 1994. Dietary carotenoids, vitamins A, C, and E, and advanced age-related macular degeneration. *Journal of the American Medical Association* 272: 1413-1420.
- Statsoft, Inc, Statistica. 2010. Data Analysis Software System, version 9.1. <http://www.statsoft.com>
- Valdez-Cepeda R., D., R. Magallanes, S. Rubio, J. L. García-Hernández, B. Murillo, E. Troyo, F. Blanco. 2005. Normas nutrimentales DNC para Chile (*Capsicum annum*

L.) tipo 'Mirasol' seco. *Second World Pepper Convention*. Zacatecas, Zac., México. 14-16 de Agosto de 2005. Artículo in extenso: Pp.: 150-157

- Valdez–Cepeda R., D., R Magallanes–Quintanar, F. Blanco–Macías, E. A. Hernández–Caraballo y J. L. García–Hernández. 2013. Comparison among Boltzmann and Cubic Polynomial Models for Estimation of Compositional Nutrient Diagnosis Standards: *Opuntia ficus indica* L. Case. *Journal of Plant Nutrition* 36(6): 895-910.
- Vera-Guzmán A., M., J. L. Chávez-Servia, J. C. Carrillo-Rodríguez y G. López M. 2011. Phytochemical evaluation of wild and cultivated pepper (*Capsicum annum* L. and *C. pubescens* Ruiz & Pav.) from Oaxaca, México. *Chilean Journal of Agricultural Research* 71(4):578-585.
- Walworth J., L. and E. Summer M. 1987. The diagnosis and recommendation integrated system. (DRIS). *Advances in Soil Science* 6:149-188.
- Zhong-Hua, Ch., W. Yizhou, W. Jian-Wen, B. Mohammad, Z. Chenchen, C. García-Mata, E. Sani, C. Differ, M. Michelle, A. Hills, A. Amtmann and M. R. Blatt. 2016. Nitrate reductase mutation alters potassium nutrition as well as nitric oxide-mediated control of guard cell ion channels in Arabidopsis. *New Phytologist* (2016) 209: 1456–1469.