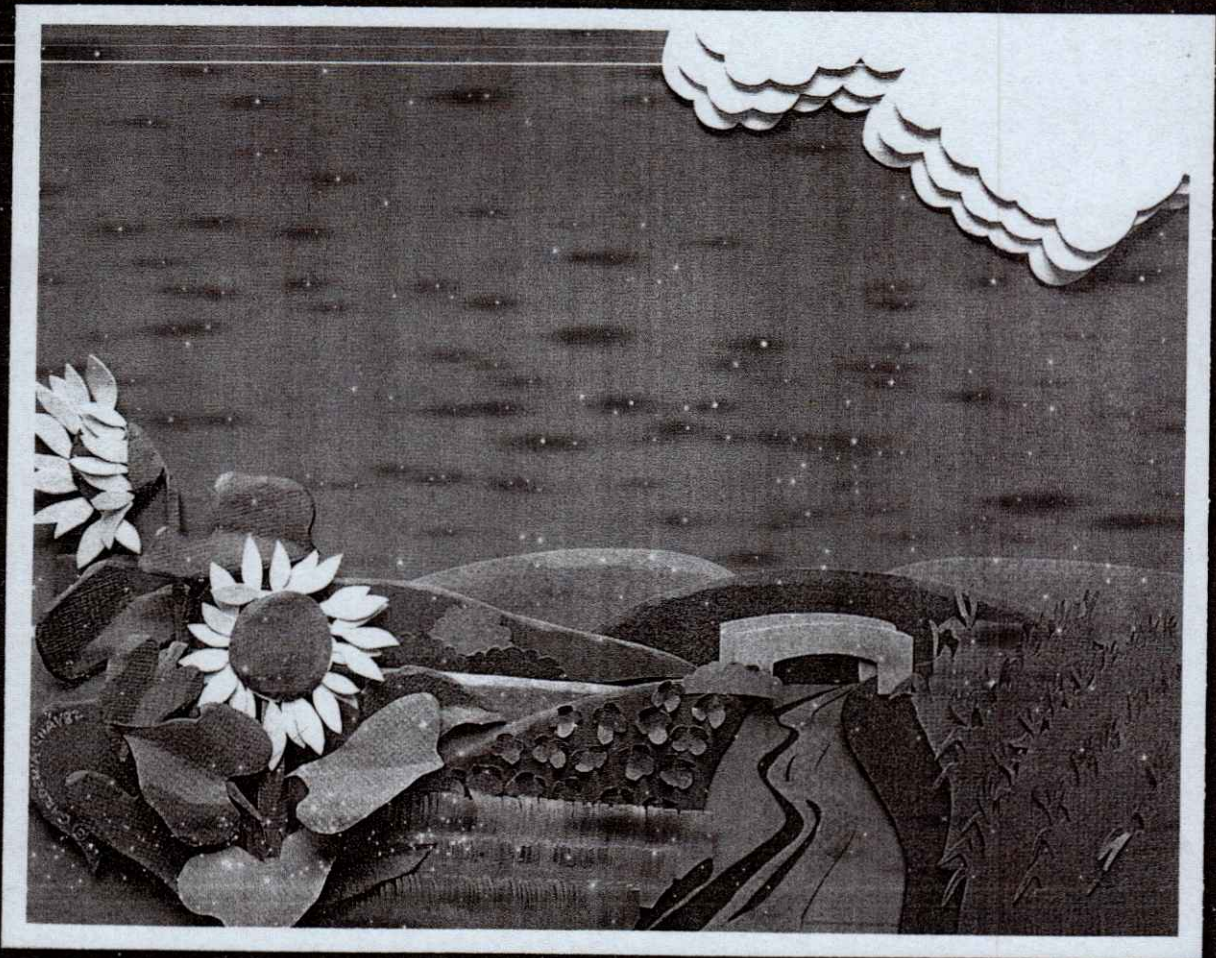


ISSN 0187-5779

TERRA

ABRIL - JUNIO DE 2001 • VOLUMEN 19 • NUMERO 2



Organo Científico
de la Sociedad Mexicana
de la Ciencia del Suelo A.C.

TERRA

SOCIEDAD MEXICANA DE LA CIENCIA DEL SUELO A.C.

MESA DIRECTIVA 2001-2002

Presidente	Dr. Francisco Gavi Reyes
Vicpresidente	Dra. Ma. Edna Alvarez Sánchez
Secretario General	Dra. Ma. de las Nieves Rodríguez Mendoza
Tesorero	M. Sc. Jesús Gómez Díaz
Secretario Técnico	Dr. Rogelio A. Juárez González
Secretaria de Relaciones Internacionales	Dra. Norma García Calderón
Vocales	M.C. Carlos Tavares Espinosa Ing. Andrés Espinosa Carmona Dr. Sergio A. Enríquez M.C. Romel de la Garza Dr. Diego González Eguarte

DIVISIONES Y DISCIPLINAS

División I: Diagnóstico, Metodología y Evaluación del Recurso Suelo

- a) Génesis, Morfología y Clasificación de Suelos
- b) Física de Suelos
- c) Química de Suelos
- d) Contaminación

División II: Relación Suelo - Clima - Biota

- a) Nutrición Vegetal
- b) Relación Agua - Suelo - Planta - Atmósfera
- c) Biología del Suelo
- d) Tecnología y Uso de Fertilizantes
- e) Uso y Manejo del Agua

División III: Aprovechamiento del Recurso Suelo

- a) Conservación del Suelo
- b) Drenaje y Recuperación
- c) Fertilidad
- d) Productividad de Agrosistemas

División IV: Educación y Asistencia Técnica

- a) Educación
- b) Crédito y Asistencia Técnica

TERRA registro en trámite.
Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Abril - Junio de 2001 Volumen 19 Número 2

ISSN 0187 - 5779

Los artículos publicados son responsabilidad absoluta de los autores. Se autoriza la reproducción parcial o total de esta revista, citándola como fuente de información. Las contribuciones a esta revista deben enviarse, en original y dos copias, redactadas conforme a las Normas para Publicación en la Revista **TERRA** a:
Editor de la Revista **TERRA**, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, Estado de México, México.

Oficinas: Edificio del Departamento de Suelos
Universidad Autónoma Chapingo
56230 Chapingo, Estado de México.

Teléfono: +01(5) 954 60 24 **Fax:** +01(5) 954 80 76
e-mail: smcs@taurus1.chapingo.mx

EDITOR
EDITOR ADJUNTO
EDITORES TECNICOS

Dr. Antonio Vázquez Alarcón
Dr. Javier Z. Castellanos
Dr. Gabriel Alcántar González
Dr. Víctor M. Ordaz Chaparro
Dr. Juan José Peña Cabriales
Dr. Xavier X. Uvalle Bueno
Dra. Edna Alvarez Sánchez
Dr. Mateo Vargas Hernández
Dra. Carmen Gutiérrez Castorena
Dr. David Espinosa Victoria
M.C. Jorge Alvarado López
M.C. Langen Corlay Chee
Ina Aalmers de Aguilar
Diane Fumiko Miyoshi Udo

EDITORES DE ESTILO

EDITORA DE ESTILO
EN INGLES

EQUIPO EDITORIAL ADMINISTRATIVO

Ina Aalmers de Aguilar
Sofía Blancas Cando
Ricarda Torres Estrada
Gardenia Chávez Peña

Diseño de portada

EDITORES ASOCIADOS NACIONALES

Dr. Manuel Anaya Garduño
Dr. Jesús Caballero Mellado
Dr. Lenom J. Cajuste
Dr. Ronald Ferrera Cerrato
Dr. Benjamín Figueroa Sandoval
M.C. Margarita E. Gutiérrez Ruiz
Dr. Reggie J. Laird
Dr. Angel Martínez Garza
Dr. Roberto Núñez Escobar
Dr. Carlos Ortiz Solorio
Dr. Alejandro Velázquez Martínez
Dr. Enrique Palacios Vélez
Dr. Oscar L. Palacios Vélez
Dr. Benjamín V. Peña Olvera
Dr. Antonio Turrent Fernández
Dr. Jorgo D. Etchevers Barra

EDITORES ASOCIADOS INTERNACIONALES

Dr. Eduardo Besoain M.	Chile
Dr. Winfried E. H. Blum	Austria
Dr. Elmer Bornemisza	Costa Rica
Dr. Luis Alfredo de León	Colombia
Dr. Hari Eswaran	E.U.A.
Dr. Anthony Fischer	Australia
Dr. Juan F. Gallardo Lancho	España
Dr. Renato Grex Z.	Chile
Dr. Alberto Hernández	Cuba
Dr. José M. Hernández Moreno	España
Dr. Eric S. Jensen	Dinamarca
Dr. Walter Luzio Leighton	Chile
Dr. John T. Moraghan	E.U.A.
Dr. Héctor J. M. Morrás	Argentina
Dr. Christian Prat	Francia
Dr. Parker F. Pratt	E.U.A.
Dr. Paul Quantin	Francia
Dr. José Rodríguez	Chile
Dr. Karl Stahr	Alemania
Dr. Bernardo Van Raij	Brasil
Dr. Rafael Villegas	Cuba
Dr. Eduardo Zaffaroni	Brasil

TERRA

MEXICAN SOCIETY OF SOIL SCIENCE

BOARD

President	Dr. Francisco Gavi Reyes
Vicepresident	Dra. Ma. Edna Alvarez Sánchez
Secretary	Dra. Ma. de las Nieves Rodríguez Mendoza
Treasurer	M. Sc. Jesús D. Gómez Díaz
Technical Adviser	Dr. Rogelio A. Juárez González
International Relations	Dra. Norma García Calderón
Voters	M.C. Carlos Tavarez Espinosa
	Ing. Andrés Espinosa Carmona
	Dr. Sergio A. Enriquez
	M.C. Romel de la Garza
	Dr. Diego González Egularte

DIVISIONS AND DISCIPLINES

Division I: Diagnosis, Methodology and Evaluation of the Soil Resource

- Soil Genesis, Morphology and Classification
- Soil Physics
- Soil Chemistry
- Pollution

Division II: Soil - Climate - Biota Relationship

- Plant Nutrition
- Water - Soil - Plant - Atmosphere Relationship
- Soil Biology
- Technology and Fertilizer Use
- Water Management and Use

Division III: Use of the Soil Resource

- Soil Conservation
- Drainage and Restoration
- Soil Fertility
- Agrosystem Productivity

Division IV: Education and Technical Assistance

- Education
- Credit and Technical Assistance

TERRA Registration pending
Scientific publication of the Mexican Society of Soil Science
April - June, 2001 Volume 19 Num. 2

ISSN 0187 - 5779

The authors take full responsibility for the articles published. Partial or total reproduction of the content of this journal is authorized, as long as this publication is cited as the information source. When submitting articles to this journal, an original and two copies must be sent to:

Editor de la Revista TERRA, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A.C.
Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, Estado de México, México.

Office address: Edificio del Departamento de Suelos
Universidad Autónoma Chapingo
56230 Chapingo, Estado de México.

Telephone: +52 (5) 954 60 24 Fax: +52 (5) 954 80 76
e-mail: smcs@taurus1.chapingo.mx

EDITOR
ASSOCIATE EDITOR
TECHNICAL EDITORS

Dr. Antonio Vázquez Alarcón
Dr. Javier Z. Castellanos
Dr. Gabriel Alcántar González
Dr. Víctor M. Ordaz Chaparro
Dr. Juan José Peña Cabriales
Dr. Xavier X. Uvalle Buano
Dra. Edna Alvarez Sánchez
Dr. Mateo Vargas Hernández
Dra. Carmen Gutiérrez Castorena
Dr. David Espinosa Victoria
M.C. Jorge Alvarado López
M.C. Langen Corlay Chee
Ina Aalmers de Agullar
Diane Fumiko Miyoshi Udo

STYLE EDITORS

ENGLISH EDITOR

EDITORIAL STAFF

Cover design

Ina Aalmers de Agullar
Sofía Blancas Cando
Ricarda Torres Estrada
Gardenia Chávez Peña

NATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Dr. Manuel Anaya Garduño
Dr. Jesús Caballero Mellado
Dr. Lenom J. Cajuste
Dr. Ronald Ferrera Cerrato
Dr. Benjamín Figueroa Sandoval
M.C. Margarita E. Gutiérrez Ruiz
Dr. Reggie J. Laird
Dr. Angel Martínez Garza
Dr. Roberto Núñez Escobar
Dr. Carlos Ortiz Solorio
Dr. Alejandro Velázquez Martínez
Dr. Enrique Palacios Vélez
Dr. Oscar L. Palacios Vélez
Dr. Benjamín V. Peña Olivera
Dr. Antonio Turrent Fernández
Dr. Jorge D. Etchevers Barra

INTERNATIONAL ASSOCIATE EDITORS

Dr. Eduardo Besoain M.	Chile
Dr. Winfried E. H. Blum	Austria
Dr. Elmer Bornemisza	Costa Rica
Dr. Luis Alfredo de León	Colombia
Dr. Hari Eswaran	U.S.A.
Dr. Anthony Fischer	Australia
Dr. Juan F. Gallardo Lancho	Spain
Dr. Renato Grez Z.	Chile
Dr. Alberto Hernández	Cuba
Dr. José M. Hernández Moreno	Spain
Dr. Eric S. Jensen	Denmark
Dr. Walter Luzio Leighton	Chile
Dr. John T. Moraghan	U.S.A.
Dr. Héctor J. M. Morrás	Argentina
Dr. Christian Prat	France
Dr. Parker F. Pratt	U.S.A.
Dr. Paul Quantin	France
Dr. José Rodríguez	Chile
Dr. Karl Stahr	Germany
Dr. Bernardo Van Raij	Brazil
Dr. Rafael Villegas	Cuba
Dr. Eduardo Zaffaroni	Brazil

TERRA

ABRIL - JUNIO DE 2001 • VOLUMEN 19 • NUMERO 2
APRIL - JUNE, 2001 • VOLUME 19 • NUMBER 2

DIVISION I

- 105 Estimación de alófano y su relación con otros parámetros químicos en Andisoles de montaña del volcán Cofre de Perote. Estimation of allophane and its relationship with other chemical parameters in mountain Andisols of the volcano Cofre de Perote. *Adolfo Campos Cascaredo, Klaudia Oleschko, Lourdes Cruz Huerta, Jorge D. Etchevers B. y Claudia Hidalgo M.*

DIVISION II

- 117 Efecto de N, P y K en plantas de chile jalapeño infectadas con el virus jaspeado del tabaco. Effects of N, P, and K on jalapeño pepper plants infected with tobacco etch virus. *V. A. Velasco Velasco, G. Alcántar González, P. Sánchez García, E. Estañol Botello, E. Zavaleta Mejía, E. Cárdenas Soriano, R. Rodríguez Montessoro y A. Martínez Garza*
- 127 Concentración nutrimental en hojas e inflorescencias de tres cultivares de aguacatero. Nutrient concentration in leaves and inflorescences of three avocado cultivars. *M. Figueroa-Ruiz, A. M. Castillo-González, E. Avila-García y J. L. Tirado-Torres*

DIVISION III

- 133 Desarrollo y calidad del portainjerto de chicozapote inoculado con *Glomus mosseae*, aspersión de AG_3 y fertilización NPK al suelo y foliar. Development and rootstock quality of chicozapote (*Manilkara sapota* L.) inoculated with *Glomus mosseae*, AG_3 spray, and NPK fertilization on soil and foliar. *F. A. Parada B., D. Jaén C., A. E. Becerril R. y E. García P.*

141 Asociación lupino-maíz en la nutrición fosfatada en un Andosol.
Association lupinus-maize in phosphate nutrition in an Andosol.
*Adán Rodas Cifuentes, Roberto Núñez-Escobar,
Vicente Espinosa Hernández y Gabriel Alcántar González*

155 Eficiencia de recuperación del nitrógeno fertilizante en soca
de caña de azúcar sometida a diferentes manejos de
fertilización.
Nitrogen fertilizer recovery efficiency by sugar cane ratoon
submitted to different fertilization management.
*Sergio Salgado García, Roberto Núñez-Escobar,
Juan J. Peña Cabriales, Jorge D. Etchevers Barra,
David J. Palma López y R. Marcos Soto*

163 Estado nutrimental del limón mexicano en suelos calcimórficos.
Nutritional status of Mexican lime in calcareous soils.
*R. Maldonado T., J. D. Etchevers B., G. Alcántar G.,
J. Rodríguez A. y M. T. Colinas L.*

175 Consecuencia de la fertilización nitrogenada y fosfórica sobre
la producción de avena irrigada con agua residual.
Consequence of nitrogen and phosphorous fertilization on
production of oats irrigated with waste water.
Jesús P. Amado Alvarez y Pedro Ortiz Franco

183 Uso del agua de la laguna Bustillos para la producción de
maíz.
Use of water from Bustillos lake for maize production.
Pedro Ortiz Franco y Jesús P. Amado Alvarez

NOTA DE INVESTIGACION/Research Note

191 Optimización del riego con cinta superficial y enterrada en
espárrago.
Optimizing irrigation with surface and subsurface trickle on
asparagus.
Adán Fimbres Fontes

CARTA AL EDITOR

197 Programa de Intercomparación de Análisis de Suelos y de
Plantas.
M. en C. Rosa Ma. López Romero

ESTIMACION DE ALOFANO Y SU RELACION CON OTROS PARAMETROS QUIMICOS EN ANDISOLES DE MONTAÑA DEL VOLCAN COFRE DE PEROTE

Estimation of Allophane and its Relationship with Other Chemical Parameters in Mountain Andisols of the Volcano Cofre de Perote

Adolfo Campos Cascareo¹, Klaudia Oleschko², Lourdes Cruz Huerta¹,
Jorge D. Etchevers B.³ y Claudia Hidalgo M.³

RESUMEN

Este estudio evaluó, en cinco perfiles del orden Andisol del volcán Cofre de Perote, el contenido de alófono y su relación con otros parámetros químicos. Los perfiles se sitúan a una altitud de 2800 a 3200 m en la ladera oriental, sur-oriental y sur. El régimen de humedad del suelo en los sitios es perúdico, údico y ústico/xérico. La reacción del suelo fue fuertemente y moderadamente ácida. Se destacó un contenido alto de carbono orgánico en los perfiles bajo régimen de humedad perúdico y resaltó la presencia del horizonte A13h de color muy negro, pero bajo régimen de humedad ústico/xérico el contenido de carbono orgánico fue muy bajo. La disolución selectiva expresada en la relación Al_p/Al_o mostró que gran parte del aluminio activo está ligado a los complejos húmicos, fundamentalmente en los horizontes A con régimen perúdico. El contenido de alófono, en los perfiles con régimen de humedad perúdico, aumentó con la profundidad y varió entre 12.9 g kg^{-1} y 169 g kg^{-1} ; las mayores cantidades se observaron en los horizontes Bw. Los perfiles ubicados con régimen de humedad údico también manifestaron cantidades importantes de alófono; éstas oscilaron entre 33 g kg^{-1} y 188 g kg^{-1} , pero no se apreció un patrón de distribución claro en los horizontes. El perfil localizado con régimen de humedad ústico/xérico manifestó las cantidades más bajas de alófono; éstas variaron entre 19 g kg^{-1} y 87 g kg^{-1} , y este perfil presentó los valores más bajos de Si_o , lo que revela un intemperismo leve de la ceniza volcánica originado

por las condiciones de humedad. Se encontró una relación lineal positiva entre el alófono y el Si_o , determinada por la ecuación:

$$\text{Alófono} = 14.7 + 5.7 Si_o, r^2 = 0.84.$$

Se pudo mostrar que el Si_o explica 84% de la variabilidad del alófono en los horizontes A. Los valores de pH_{NaF} fueron superiores a 9.4 y manifestaron una relación lineal con el alófono, determinada por la ecuación:

$$\text{Alófono} = -787 + 84pH, r^2 = 0.85.$$

Palabras clave: Ceniza volcánica, andisol de montaña, disolución selectiva.

SUMMARY

This study evaluated allophane content and its relationship with other chemical parameters in five Andisol profiles of the volcano "Cofre de Perote." The soil profiles were located at altitudes between 2800 and 3200 m on the eastern, southeastern and southern slopes. The soil moisture regimes at these sites were perudic, udic, and ustic/xeric, respectively. Soil reaction was strongly to moderately acidic. High organic carbon content was notable in profiles from the perudic regime; these profiles were highlighted by the presence of a very black A13h horizon. However, under the ustic/xeric regime, organic carbon content was very low. Selective dissolution, expressed as the ratio Al_p/Al_o , showed that much of the active aluminum was tied to humic complexes, fundamentally in the A horizons under the perudic regime. Allophane content of the soil profiles under the perudic regime increased with depth and varied between 12.9 g kg^{-1} and 169 g kg^{-1} , the highest amounts being observed in the Bw horizons. Profiles from the udic soil moisture regime also manifested important quantities of allophane. These oscillated between 33 g kg^{-1} and 188 g kg^{-1} , but no clear distribution pattern could be distinguished in the horizons. The profiles taken from the ustic/xeric

¹ Instituto de Ecología A.C. Apartado Postal 63, 91000 Xalapa, Ver. (camposad@ecologia.edu.mx)

² Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito Federal, México.

³ Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Edo. de México.

moisture regime showed the lowest amounts of allophane, varying between 19 g kg^{-1} and 87 g kg^{-1} . They also presented the lowest values of Si_0 , which indicates light weathering of the volcanic ash due to conditions of moisture. A positive linear relationship was found between allophane and Si_0 that can be expressed by the following equation:

$$\text{Allophane} = 14.7 + 5.7 \text{ Si}_0, r^2 = 0.84.$$

Furthermore, Si_0 explained 84% of the variation in allophane in the A horizons. Values of pH_{NaF} were above 9.4 and revealed a linear relationship with allophane, which was determined by the following equation:

$$\text{Allophane} = -787 + 84 \text{ pH}, r^2 = 0.85.$$

Index words: Volcanic ash, mountain andisol, selective dissolution.

INTRODUCCION

A partir de que Smith (1978) propuso elevar el suborden andept de los inceptisoles a la categoría del orden Andisol, se han examinado muchos suelos formados de materiales volcánicos, incluyendo, por supuesto, la propuesta final elaborada de los trabajos realizados por ICOMAND (Leamy *et al.*, 1988) y adoptada por Soil Survey Staff (1999). Esas investigaciones identificaron muchas propiedades químicas y físicas comunes en los Andisoles. De los factores ambientales se señalan al material parental y al clima como fundamentales en las características que presentan estos suelos (Parfitt, 1990; Ugolini y Dahlgren, 1991; Shoji *et al.*, 1993, 1996; Spaargaren, 1994; Chen Zueng-Sang *et al.*, 1999). La ceniza volcánica que da origen a estos suelos está compuesta de minerales fragmentados y de ellos predomina el vidrio volcánico, el cual muestra muy poca resistencia al intemperismo químico. Esta característica de la ceniza volcánica está ligada con la formación de Andisoles con distintas condiciones climáticas (Shoji, 1988; Mizota y Van Reeuwijk, 1989; Shoji *et al.*, 1993). Está bien documentado que el concepto central de estos suelos se sustenta fundamentalmente por la presencia de minerales de tipo aluminosilicatos no cristalinos en los que predominan alófano, imogolita y ferrihidrita y acomplejaciones de humus-aluminio (Baumler y Zech, 1994; Shoji *et al.*, 1996; Malucelli *et al.*, 1999). Sin embargo, el alófano y la imogolita no son minerales exclusivos de los Andisoles, ya que éstos se han observado, por microscopía electrónica

de alta resolución, en Espodosoles derivados de granito, gneis y esquisto (Tait *et al.*, 1978).

El término alófano es el nombre genérico que se da a un grupo de minerales no cristalinos del tamaño de la arcilla y que incluye en su composición química silicio, aluminio y agua ($\text{Al}_2\text{SiO}_5 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). El alófano se encuentra en muchos suelos, pero es común en los formados de materiales volcánicos. Los elementos del ambiente que controlan la formación del alófano son primordialmente el material geológico, la vegetación y el clima. En condiciones naturales, los suelos con alófano poseen un volumen grande pero cuando acontece una deshidratación éste disminuye de manera notable. La cantidad de agua que retienen estos suelos es muy alta, y es resultado del volumen grande y de poros pequeños que dominan (Shoji y Ono, 1978; Warkentin *et al.*, 1988). Los suelos con alófano conservan una carga eléctrica permanente baja y una carga eléctrica alta subordinada al pH, por lo que se les califica de carga eléctrica variable (Maeda *et al.*, 1977; Parfitt *et al.*, 1988; Warkentin *et al.*, 1988; Wada, 1989; Parfitt, 1990; Shoji *et al.*, 1996).

La acumulación de carbono orgánico es otra propiedad de muchos Andisoles. La estabilidad de la materia orgánica parece que ocurre por la formación de acomplejaciones del aluminio con el humus y por la adsorción de las sustancias húmicas al alófano o a la imogolita. Estos procesos tienen una participación importante en la formación de horizontes melánicos y fúlvicos (Parfitt, 1980; Shoji *et al.*, 1990; Shoji *et al.*, 1993).

Las propiedades de los Andisoles están fuertemente determinadas por la naturaleza de su fracción coloidal. Se ha observado que, en ambientes templados fríos y húmedos, la fracción coloidal de estos suelos está constituida por acomplejaciones de humus-aluminio o por alófano/imogolita (Parfitt *et al.*, 1983, 1984; Wada *et al.*, 1987; Wada 1989; Shoji *et al.*, 1993). Las acomplejaciones de humus-aluminio se forman principalmente en ambientes ricos en carbono orgánico y que presentan pH ácido (Shoji y Fujiwara, 1984).

El alófano es un aluminosilicato no cristalino que no tiene una composición química definida, pero presenta una relación atómica Al/Si entre 1 y 2. Con base en esto, en la naturaleza existen alófanos ricos en aluminio (Al/Si = 2:1) y ricos en silicio (Al/Si = 1:1). Los que muestran abundante aluminio están ligados a la imogolita por tener el mismo arreglo atómico y composición química pero diferente morfología y los

que ostentan exceso de silicio tienen silicatos polimerizados y algunos grupos ortosilicatos (Wada 1989; Shoji *et al.*, 1993). Se señala que el alófono y la imogolita se forman en ambientes edáficos que presentan pH_{H_2O} entre 4.9 y 7.0 (Quantin *et al.*, 1985; Parfitt y Kimble, 1989; Ugolini y Dahlgren, 1991; Supriyo *et al.*, 1992).

El alófono se puede estimar por una disolución selectiva. El oxalato ácido es un reactivo eficaz en la disolución del alófono y la imogolita. Este reactivo puede utilizarse para hacer una estimación cuantitativa del contenido de alófono en el suelo (Parfitt, 1990). La relación atómica Al/Si, que permite advertir la presencia de alófono, se evalúa con $(Al_o - Al_p)/Si_o$, y se utiliza la cantidad de silicio extraída con oxalato (Si_o) para estimar la cantidad de alófono (Wada, 1989; Parfitt, 1990). Como el oxalato ácido también disuelve a los complejos humus-aluminio, la cantidad de aluminio extraída con pirofosfato (Al_p) se resta de la cantidad de aluminio extraída con oxalato (Al_o).

Los principios para identificar a los Andisoles enfatizan la importancia de precisar las propiedades ándicas. Estas se basan en la combinación de criterios que se han establecido para la fracción menor que 2 mm, como: Al + 0.5Fe extraíble en oxalato $\geq 0.4\%$, retención de fósforo $\geq 85\%$, densidad aparente $< 0.90 \text{ g cm}^{-3}$ (Wada y Gunjigake, 1980; Leamy *et al.*, 1988; Soil Survey Staff, 1999).

Esta clase de suelo, en el volcán Cofre de Perote, se presenta con distintas condiciones bioclimáticas y se desarrolla de materiales piroclásticos heterogéneos. Aquí es común observar en su morfología un origen poligenético. En ambientes de altitud, a más de 2500 m, los suelos de la parte oriental y sur-oriental con régimen de humedad perúdic y údic/perúdic exhiben horizontes A muy negros y retienen más de 90% de agua gravimétrica a 1.5 MPa, pero los de la parte sur con régimen de humedad ústico/xérico son de color pardo amarillentos y sólo retienen 20% de agua gravimétrica a 1.5 MPa (Dubroeuq *et al.*, 1992; Campos y Cruz, 1996, 1997; Cruz y Campos, 1997). Los suelos de la parte alta del volcán tienen fundamentalmente vocación forestal y, por sus características físicas que poseen, son importantes en la regulación del almacenamiento y escurrimiento del agua de lluvia. Sin embargo, por un aumento palpable de la población en la región, extensas áreas con suelos forestales se han sometido a uso agrícola. Los cultivos principales son: maíz, papa y avena y, además, se practica el pastoreo de ovino y caprino; las áreas con

bosque natural prácticamente se han reducido a cañadas y a lugares abruptos.

Los objetivos del presente trabajo fueron: estimar el contenido de alófono en cinco perfiles de suelo y mostrar las relaciones que se establecen con propiedades químicas con el fin de comprender la génesis y el comportamiento de los Andisoles de montaña del volcán Cofre de Perote.

MATERIALES Y METODOS

Se estudiaron cinco perfiles de suelo ubicados en la parte oriental, sur y sur-oriental del volcán Cofre de Perote. Los sitios se sitúan a una altitud de 2800 a 3200 m.

El volcán tiene una altura de 4200 m sobre el nivel del mar y básicamente es de carácter andesítico-dacítico. La cumbre exhibe un escarpe en el lado oriental que dibuja una estructura parecida a caldera, probablemente de origen tectovolcánico (Negendank *et al.*, 1985); la base, al este de Xalapa, está datada por Cantagrel y Robin (1979) con 1.57 m.a., mientras que Yáñez y García (1982) reportan una edad de 1.7 (1.9) m.a. para lavas situadas al este del poblado de Perote. Durante el Pleistoceno reciente, el vulcanismo de esta región se caracterizó por la manifestación de conos monogenéticos con actividad efusiva pequeña y de naturaleza sub-alcalina (Negendank *et al.*, 1985).

El régimen de humedad del suelo y las condiciones de uso (Narave, 1985), para los perfiles que se estudiaron, son: perúdic para el sitio COF 26, allí predomina vegetación natural de *Abies religiosa*; perúdic para COF 17, con vegetación natural constituida por árboles dispersos del género *Pinus* y un estrato herbáceo denso de pasto (*Muhlenbergia macroura*); údic para COF 22 y COF 12, con vegetación de pasto y terrenos de cultivo de papa (*Solanum tuberosum*) y avena (*Avena sativa*); y ústico/xérico para COF 4, con uso agrícola de papa y avena. En cada perfil, se realizó una descripción de las características morfológicas y se tomaron muestras de suelo de cada horizonte. Las muestras se secaron al aire y las determinaciones físicas y químicas se efectuaron en la tierra fina $< 2 \text{ mm}$. La textura se determinó por el método de la pipeta con destrucción de materia orgánica y dispersión con hexametáfosfato de sodio y ultrasonido. El pH se midió en agua y en NaF, relación 1:2.5. El carbono orgánico se determinó por el procedimiento de Walkley y Black. Los

cationes intercambiables se extrajeron con acetato de amonio 1 N, pH 7.0 y se analizaron por absorción atómica y espectrofotometría. La retención de fósforo se examinó por el procedimiento de Blakemore *et al.* (1987). El aluminio, hierro y sílice se extrajeron con oxalato de amonio ácido (Al_o , Fe_o , Si_o) y con pirofosfato de sodio (Al_p , Fe_p , Si_p) por los procedimientos descritos en Blakemore *et al.* (1987); además, el hierro y el aluminio se removieron con ditionito citrato bicarbonato (Fe_d , Al_p) por el procedimiento de Mehra y Jackson (1960). El contenido de alófono se estimó con la relación $(Al_o - Al_p)/Si_o$, propuesta por Parfitt (1990).

RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados de las determinaciones químicas, físicas, de la disolución selectiva y del contenido de alófono, de los cinco perfiles de suelo, se presentan en los Cuadros 1 y 2.

Características Morfológicas y Físicas

Los horizontes A de los perfiles COF 17 y COF 26, con régimen de humedad perúdicico, son de color pardo grisáceo oscuro, pardo grisáceo muy oscuro y negro; lo que evidencia una acumulación importante de materia orgánica. En general, los horizontes A de estos perfiles son profundos (150 y 180 cm), presentan estructura granular fina y muy fina y son de consistencia muy friable; el color negro del horizonte A13h resalta. Los horizontes Bw de estos perfiles son de color pardo y pardo amarillento y tienen una estructura de bloques subangular.

Los horizontes A de los perfiles COF 12 y COF 22, con régimen de humedad údicico, son de color pardo, pardo amarillento oscuro, pardo oscuro y negro, lo que refleja la presencia de materia orgánica. Los espesores de los horizontes A son de 80 y 130 cm. La estructura es granular muy fina y fina, y la consistencia en seco es suelta. Los horizontes Bw de estos perfiles son de color pardo, pardo oscuro y pardo amarillento oscuro, y presentan estructura de bloques subangular. En el perfil COF 12 es palpable una capa (130 a 170 cm) de color amarillo pardusco constituida fundamentalmente de arena fina y, con base en observaciones con lupa, la forma sobre todo vidrio volcánico.

Los horizontes A del perfil COF 4, con régimen de humedad ústico/xérico, son de color pardo amarillento, amarillo pardusco y pardo amarillento

oscuro, lo que manifiesta una escasa reserva de materia orgánica. Este horizonte tiene un espesor de 80 cm, presenta estructura de tipo granular muy fina y de consistencia, en seco, suelta. Los horizontes Bw son de color pardo y pardo amarillento oscuro, presentan estructura de bloques subangular de tamaño fino y la consistencia es friable.

La densidad aparente en los horizontes que se determinó, varió entre 0.31 y 1.0 g cm⁻³. Estos valores son bajos y, en general, se aprecia que están ligados con el contenido alto de humus, con la formación de microagregados y, en particular, con la densidad baja de las partículas (Maeda *et al.*, 1977; Warkentin *et al.*, 1988; Shoji *et al.*, 1993). Los valores bajos de densidad aparente y la formación de microagregados estables al agua sustentan una porosidad alta y respaldan una permeabilidad alta. Está bien fundamentado que la formación de los microagregados, en los Andisoles, se favorece por la presencia de minerales no cristalinos y de materia orgánica (Shoji *et al.*, 1993).

Propiedades Químicas

En general, la reserva de bases intercambiables fue baja en todos los perfiles estudiados y las cantidades mayores se destacaron en el COF 4, ubicado en la parte seca (Cuadro 1). Los gráficos de caja y eje (Figuras 1 y 2) muestran que en los horizontes A, en 50% de las observaciones, el calcio varió entre 1.9 y 4.7 cmol(+) kg⁻¹, con una mediana de 2.6 cmol(+) kg⁻¹; el magnesio osciló entre 0.35 y 0.87 cmol(+) kg⁻¹ con una mediana de 0.5 cmol(+) kg⁻¹; mientras que el potasio cambió de 0.1 a 0.6 cmol(+) kg⁻¹, con una mediana de 0.2 cmol(+) kg⁻¹. Así también en los horizontes Bw, las bases se comportaron de manera similar a los horizontes A, para 50% de las observaciones el calcio fluctuó entre 1.9 y 4.8 cmol(+) kg⁻¹ con una mediana de 2.8, el magnesio varió de 0.5 a 0.9 cmol(+) kg⁻¹ con una mediana de 0.8 cmol(+) kg⁻¹; en cambio, el potasio osciló entre 1.1 y 1.9 cmol(+) kg⁻¹ con una mediana de 1.3 cmol(+) kg⁻¹. Es importante destacar las cantidades altas de potasio de los horizontes Bw, que seguramente están ligadas con la presencia de minerales primarios potásicos que son frecuentes en materiales volcánicos.

La reacción del suelo fue fuertemente ácida en todos los horizontes del perfil COF 17, moderadamente ácida en COF 26 y COF 22, con la excepción del horizonte Ap donde fue fuertemente

Cuadro 1. Características químicas y físicas de los suelos del Cofre de Perote.

Hori- zonte	Profun- didad cm	Color	Arena ----- % -----	Limo ----- % -----	Arcilla ----- % -----	Da g cm ⁻³	pH ¹	C %	P mg kg ⁻¹	Ca ----- cmol(+).kg ⁻¹ -----	Mg ----- cmol(+).kg ⁻¹ -----	K ----- cmol(+).kg ⁻¹ -----	Na ----- cmol(+).kg ⁻¹ -----
COF 17, perúdic, 2800 msnm; Hydric Pachic Melanudand													
A11	0-55	10YR2/1	9.8	82.6	7.6	0.50	4.9	8.93	5	2.1	0.22	0.11	0.63
A12	55-110	10YR3/2	9.6	83.3	7.1	0.36	5.2	7.89	6	1.9	1.40	0.07	0.57
A13h	110-150	10YR2/0	-	-	-	0.31	5.1	12.0	6	1.9	0.17	0.06	0.46
Bw	150-200	10YR5/6	4.0	84.3	11.7	nd	5.1	1.74	7	1.2	0.14	0.05	0.42
COF 22, údic, 2815 msnm; Typic Fulvudand													
Ap	0-20	10YR3/2	9.5	86.4	4.1	0.89	5.2	6.73	6	2.5	0.39	0.21	0.49
A12	20-45	10YR4/3	18.4	76.5	5.1	nd	5.5	2.03	7	1.6	0.28	0.17	0.57
A13	45-80	10YR4/6	30.4	59.4	10.2	nd	5.5	0.64	8	1.4	0.40	0.12	0.46
Bw1	80-180	7.5YR4/4	1.7	70.2	28.3	nd	6.1	0.46	7	2.2	1.10	1.92	0.97
Bw2	180-220	2.5Y5/4	4.6	74.4	20.9	nd	5.8	0.23	8	2.1	0.68	1.33	1.00
COF 4, ústico/xérico, 2900 msnm; Typic Ustivitrond													
Ap	0-12	10YR5/4	10.1	79.7	10.3	0.9	5.2	1.98	12	3.9	0.32	0.90	0.34
A12	12-35	10YR6/6	19.8	73.0	7.2	nd	6.1	0.20	3	8.3	0.60	0.87	0.44
A13	35-80	10YR4/4	25.8	66.0	9.2	nd	6.3	0.06	4	6.6	0.64	1.66	0.35
Bw1	80-145	10YR4/6	23.8	67.5	8.7	nd	6.4	0.09	t	12.0	1.98	1.74	0.45
2Bw2	145-180	10YR4/4	22.9	66.1	11.0	nd	6.5	0.01	3	5.5	0.54	2.01	0.54
2Bw3b	180-240	10YR4/3	28.2	64.0	7.8	nd	6.6	0.01	2	4.1	0.93	2.25	0.66
COF 26, perúdic, 3200 msnm; Hydric Pachic Melanudand													
A11	0-10	10YR3/2	11.8	78.2	9.4	0.90	5.5	12.9	7.0	8.0	2.3	0.65	0.16
A12	10-50	10YR4/2	9.9	82.4	7.8	0.70	5.7	7.0	t	5.0	0.74	0.35	0.06
A13	50-90	10YR4/2	10.2	82.8	6.9	0.90	5.7	7.9	t	4.4	1.00	0.21	0.10
A14h	90-180	10YR2/0	9.4	75.6	15.1	0.46	5.6	12.7	t	4.3	1.40	0.37	0.21
Bw	180-200	10YR5/3	13.7	74.6	11.7	1.03	5.3	3.4	t	4.8	0.17	0.10	0.14
COF 12, údic, 2900 msnm; Alic Hapludand													
A11	0-45	10YR2/1	9.7	80.3	10.0	0.52	4.8	9.3	6.1	2.8	0.51	0.10	0.38
A12	45-105	10YR3/3	13.5	69.9	16.6	0.58	5.3	4.2	7.7	2.2	0.41	0.62	0.61
A13	105-130	10YR3/4	20.7	70.9	8.4	0.46	5.5	1.7	8.4	1.4	0.60	0.10	0.42
C	130-170	10YR6/8	54.7	37.0	18.3	nd	5.4	0.06	6.8	0.5	0.24	0.10	0.31
ABb	170-185	7.5YR4/4	2.5	79.5	18.0	nd	5.3	0.26	7.5	1.9	0.82	1.10	0.76
Bw1	185-195	10YR4/4	0.6	81.2	18.2	nd	5.2	0.20	7.3	1.8	0.84	1.30	0.69
Bw2	195-215	7.5YR4/6	1.2	81.9	16.9	nd	5.3	0.15	7.4	1.8	0.77	0.93	0.77
Bw3	215-240	7.5YR3/4	0.4	73.4	26.2	nd	5.6	0.76	7.3	3.4	0.81	1.20	0.82

¹ en H₂O, rel. 1:2.5.

nd = no determinada; msnm = metros sobre el nivel del mar.

ácida. Los horizontes superiores del COF 12 manifestaron una reacción fuertemente ácida, pero los inferiores, a partir del A13, una reacción moderadamente ácida. El perfil COF 4 en la parte más seca mostró, con la excepción del horizonte Ap, el pH más alto, con una reacción ligeramente ácida.

El carbono orgánico de los horizontes A mostró un patrón de acumulación asociado al régimen de humedad (Figura 3). El contenido más alto se presentó en los perfiles con régimen perúdic; en ese ambiente el contenido promedio de carbono orgánico, en los horizontes A, fue de 9.9%; sin embargo, es importante destacar las cantidades de 12% y mayores de carbono orgánico y también el color negro intenso en los horizontes A13h. Las características del horizonte

A13h podrían estar asociadas a la migración de sustancias orgánicas en un ambiente perúdic o a la naturaleza intermitente de los depósitos de ceniza volcánica (Ping *et al.*, 1989). En general, el contenido alto de carbono orgánico se atribuyó, en parte, a la formación de complejos estables de sustancias húmicas con aluminio, hierro y constituyentes no cristalinos que los protegen de la degradación microbiana (Wada, 1980, 1985, 1989; Shoji *et al.*, 1990, 1993; Nizeyimana, 1997). El contenido más bajo de carbono se presentó en COF 4, situado en régimen ústico/xérico. La escasa precipitación y la actividad agrícola de temporal, que distinguen a este lugar, son las condiciones ambientales que contribuyen a la baja captura de carbono. El contenido

Cuadro 2. Análisis químico de disolución selectiva de los suelos del Cofre de Perote.

Horizonte	pH [†] NaF	P ret.	Al _d	Fe _d	Al _p	Fe _p	Al _o	Fe _o	Si _o	Alófano	Al _o +5 Fe _o	Al _p /Al _o
----- % -----												
COF 17												
A11	11.26	97	2.60	1.04	2.14	0.54	3.16	0.68	0.39	3.9	3.50	0.68
A12	11.24	96	2.29	1.75	1.43	0.28	2.57	1.03	0.57	4.0	3.08	0.55
A13h	11.20	98	3.31	1.80	2.70	1.08	6.12	1.28	1.40	14.0	6.76	0.44
Bw	10.97	96	2.13	4.17	0.76	0.04	4.81	1.38	2.18	15.3	5.50	0.16
COF 22												
Ap	10.95	89	1.79	1.26	1.17	0.16	2.59	0.55	0.54	5.4	2.86	0.45
A12	10.49	94	1.48	1.95	0.61	t	3.23	0.57	1.00	10.0	3.51	0.19
A13	10.43	86	1.00	2.42	0.32	t	2.28	0.79	0.85	7.2	2.67	0.14
Bw1	9.73	66	0.80	4.66	0.66	0.27	0.65	1.02	0.77	-	1.16	1.01
Bw2	9.43	66	0.33	2.22	0.29	0.05	0.70	0.77	1.10	-	1.08	0.41
COF 4												
Ap	10.37	80	1.12	1.84	0.43	t	2.65	0.39	0.87	8.7	2.84	0.16
A12	10.09	66	0.51	2.41	0.14	t	1.16	0.73	0.32	4.5	1.52	0.12
A13	9.52	57	0.22	1.95	0.10	t	0.50	0.56	0.38	1.9	0.78	0.20
Bw1	9.39	29	0.26	2.32	0.12	t	0.88	0.55	0.81	4.0	1.15	0.14
Bw2	9.16	34	0.16	1.52	0.03	t	0.16	0.14	0.25	-	0.23	0.19
2Bw3b	9.20	43	0.13	1.82	0.16	t	0.18	0.21	0.32	-	0.28	0.89
COF 26												
A11	11.0	96	2.45	1.13	1.81	0.57	1.82	0.78	0.30	1.29	2.21	0.99
A12	11.1	96	2.16	1.81	1.72	0.75	2.63	1.02	1.00	5.30	3.14	0.65
A13	11.2	97	2.76	2.94	2.13	1.01	4.62	1.87	1.75	10.22	5.55	0.46
A14h	11.3	98	3.45	2.36	2.98	1.43	4.53	1.68	1.55	7.75	5.37	0.65
Bw	11.2	97	2.45	2.73	1.27	0.31	5.88	1.84	2.57	16.91	6.80	0.21
COF 12												
A11	11.1	97	2.20	1.10	1.84	0.50	2.22	0.60	0.68	3.31	2.52	0.82
A12	11.1	98	2.42	3.18	1.00	t	5.62	1.52	2.47	16.64	6.38	0.17
A13	10.9	98	1.73	3.06	0.70	t	5.31	1.30	3.21	18.81	5.96	0.13
C	10.6	91	0.29	0.49	0.20	t	2.83	0.07	1.79	10.63	2.86	0.07
ABb	10.2	89	0.93	3.81	0.42	t	1.45	1.14	0.97	4.96	2.02	0.29
Bw1	10.4	90	0.42	1.78	0.26	0.01	1.98	0.96	1.30	7.33	2.46	0.13
Bw2	10.4	95	0.64	2.99	0.36	0.02	2.81	0.93	1.78	10.21	2.46	0.13
Bw3	9.9	82	0.70	3.94	1.30	1.05	0.83	1.31	0.41	-	1.48	1.50

† = rel. 1:2.5.

t = trazas.

intermedio de carbono se observó en los horizontes A de los perfiles localizados en régimen de humedad údico (Figura 3).

Disolución Selectiva y Constituyentes No-Cristalinos

Los datos de la disolución selectiva (Cuadro 2) muestran cantidades altas y muy altas de Al_p en los horizontes A de los perfiles con régimen perúdic. Las cantidades de Al_o fueron, con la excepción del COF 4, muy altas en los horizontes A e inclusive en los perfiles localizados en régimen perúdic éste

aumentó con la profundidad. Los valores de Si_o, salvo en COF 4, fueron altos e incluso para muchos horizontes éste se incrementó con la profundidad. La relación Al_p/Al_o alta que se presentó, sobre todo en los perfiles COF 17 y COF 26, indica que una proporción importante de aluminio activo está ligada al humus, en régimen perúdic. Algunos autores (Parfitt y Saigusa, 1985; Shoji *et al.*, 1988, 1993; Nizeyimana *et al.*, 1997) señalaron que en ambientes donde la relación Al_p/Al_o es superior a 0.5 se obstaculiza la síntesis de alófano y aquél que se forma, presenta en su constitución alto contenido de aluminio; en cambio, cuando la relación es inferior, se favorece la formación de alófano rico en silicio.

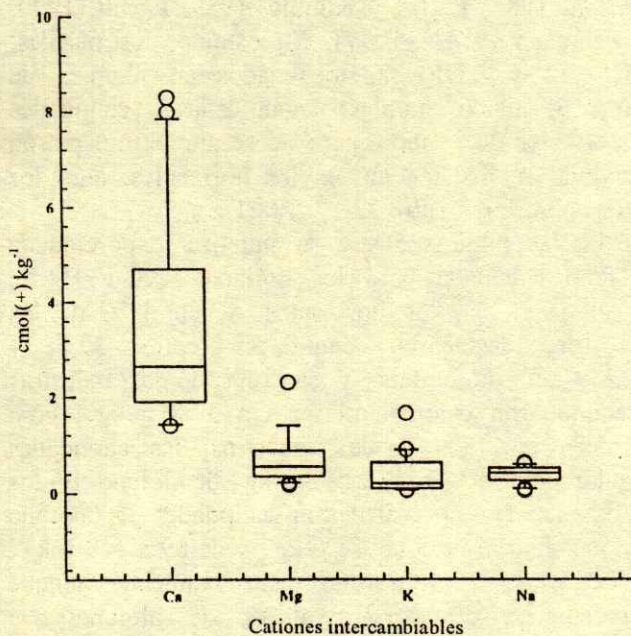


Figura 1. Gráfica de caja y eje de la reserva de bases en los horizontes A. La caja representa 50% de los valores. La línea horizontal dentro de la caja marca la mediana.

El Al_p corresponde al aluminio activo acomplejado en las sustancias húmicas. En la Figura 4 se aprecia, para los horizontes A, una relación lineal

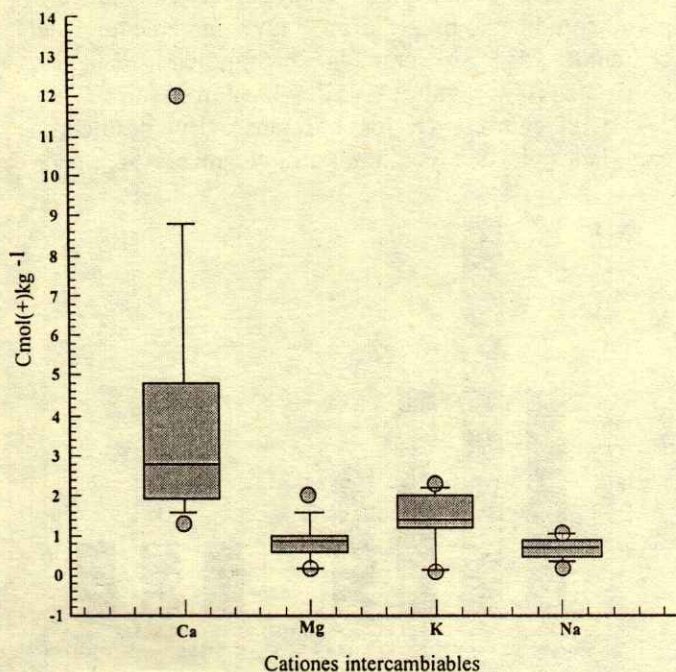


Figura 2. Gráfica de caja y eje de la reserva de bases en los horizontes B. La caja representa 50% de los valores. La línea horizontal dentro de la caja marca la mediana.

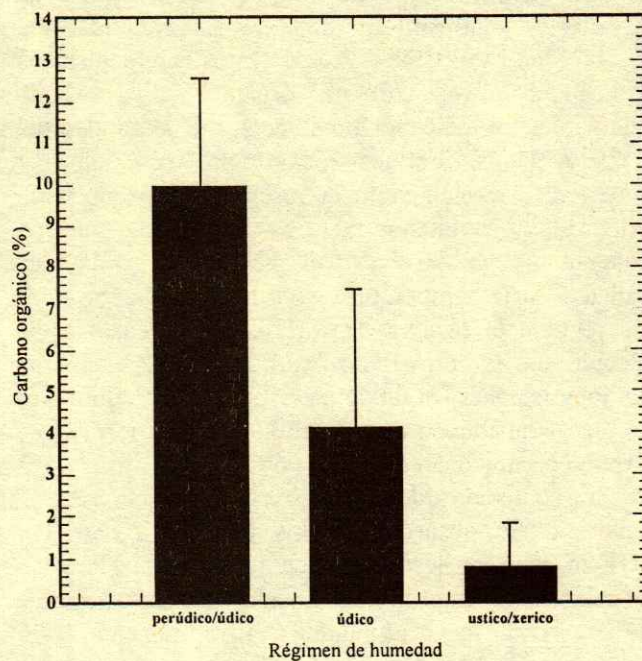


Figura 3. Promedio del contenido de carbono orgánico de los horizontes A para los regímenes de humedad del suelo. La línea en cada barra indica la desviación estándar.

entre Al_p y el carbono orgánico sustentada por la ecuación:

$$Al_p = 0.19 + 0.18CO$$

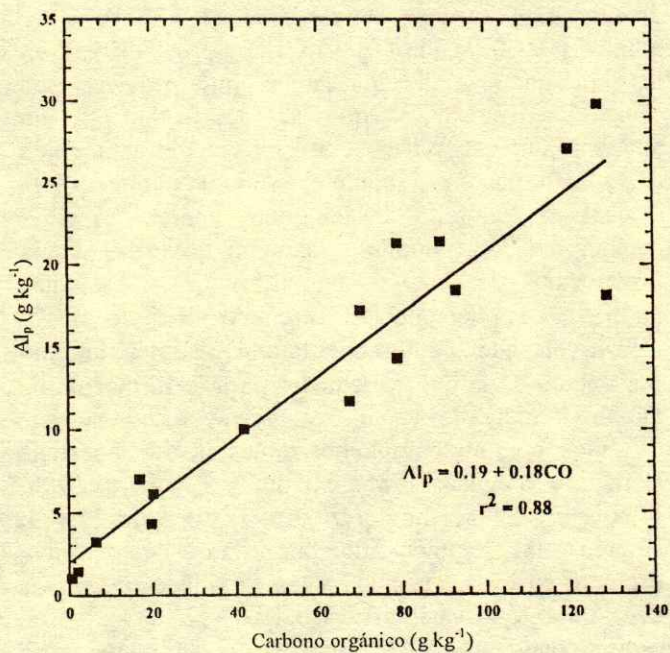


Figura 4. Relación entre el aluminio extraído con pirofosfato (Al_p) y el contenido de carbono orgánico en los horizontes A.

Con base en el coeficiente de determinación de esa relación se afirma que 88% de la variabilidad del Al_p en los horizontes A de estos ambientes es explicada por el carbono orgánico. El carbono orgánico es un indicador fundamental de la calidad del suelo y de la producción agrícola sostenible. El tamaño y el reciclaje de la reserva de carbono son controlados por muchos factores. En los Andisoles de montaña del volcán Cofre de Perote, el régimen de humedad y la temperatura son factores importantes que regulan la reserva de carbono orgánico, pero la relación que se obtuvo entre carbono y Al_p revela que las interacciones organominerales (humus-aluminio) también contribuyen a la estabilidad de la reserva de carbono orgánico del suelo.

El contenido de alófono se presenta en el Cuadro 2. Se observó que los perfiles COF 17 y COF 26, que se desarrollan en régimen de humedad perúdic, manifestaron un aumento en el contenido de alófono con la profundidad, allí las cantidades variaron entre 12.9 g kg^{-1} y 169.1 g kg^{-1} . El contenido más bajo de alófono se presentó en los horizontes A de estos perfiles y ello se atribuye al contenido de carbono orgánico como lo muestran los valores altos de Al_p . En este régimen de humedad, la formación de alófono es más viable en los horizontes Bw por la concentración baja de silicio en la solución del suelo, por que la mayoría del silicio, que proviene de la alteración de la ceniza volcánica, se pierde en el drenaje. Con base en Wada *et al.* (1987), Parfitt y Kimble (1989), Wada (1989) y Shoji *et al.* (1993), en los horizontes A de los suelos que provienen de cenizas volcánicas y que se desarrollan en un ambiente húmedo y frío ocurre un vínculo antagónico entre la formación de complejos humus-aluminio y la síntesis de alófono e imogolita; parece que la disponibilidad de aluminio es un factor crítico en la producción de estos minerales. Las sustancias húmicas compiten por el aluminio liberado de la ceniza volcánica y esto abate la actividad del aluminio por debajo de la que se requiere para la formación de alófono e imogolita; en su lugar, se favorece la síntesis de sílice opalino en los horizontes de la superficie (Parfitt y Saigusa, 1985; Mizota y Chapelle, 1988; Ping *et al.*, 1988; Shoji *et al.*, 1993). El perfil COF 4, situado en régimen de humedad ústico/xérico, presentó en los horizontes A las cantidades más altas de alófono, que variaron entre 19.0 y 87 g kg^{-1} . Con estas condiciones de humedad se favorece un ambiente rico en silicio en la solución del suelo que contribuye a la formación de alófono (Parfitt y

Wilson, 1985; Parfitt y Kimble, 1989; Parfitt, 1990; Nizeyimana *et al.*, 1997). En cambio, los perfiles, COF 12 y COF 22, localizados en régimen de humedad údico, también manifestaron cantidades importantes de alófono, pero no se apreció un patrón claro de su distribución en los horizontes; aquí los valores oscilaron entre 33.1 y 188.1 g kg^{-1} .

En las Figuras 5 y 6 se sintetiza la porción de alófono calculada para los horizontes A y B. Se observó que en los horizontes A, en 31% de las muestras destacaron cantidades entre 37.8 y 62.8 g kg^{-1} de alófono y en 18% de las muestras predominaron valores inferiores a 37.8 g kg^{-1} ; pero también en 18% de las muestras, las cantidades oscilaron entre 137.8 y 212.8 g kg^{-1} de alófono. En los horizontes Bw, prevalecieron cantidades de alófono que cambiaron de 39 a 64 g kg^{-1} y de 89 a 114 g kg^{-1} en 28% de las muestras, respectivamente, aunque también se destacaron valores de alófono que fluctuaron entre 164 y 189 g kg^{-1} en 14% de las muestras.

El silicio de suelos volcánicos extraído con oxalato ácido (Si_o) proviene fundamentalmente del alófono y de la imogolita (Parfitt, 1990; Shoji *et al.*, 1993; Nizeyimana *et al.*, 1997).

En los perfiles estudiados, el contenido de Si_o mostró variaciones importantes. Los perfiles COF 17 y COF 26, localizados en régimen de humedad perúdic/údic, presentaron un incremento del contenido de Si_o con la profundidad. En los horizontes A, los valores de Si_o oscilaron entre 0.3 y 1.7% ; en cambio, en los horizontes Bw destacaron cantidades de 2.1 y 2.5% . Prácticamente se puede

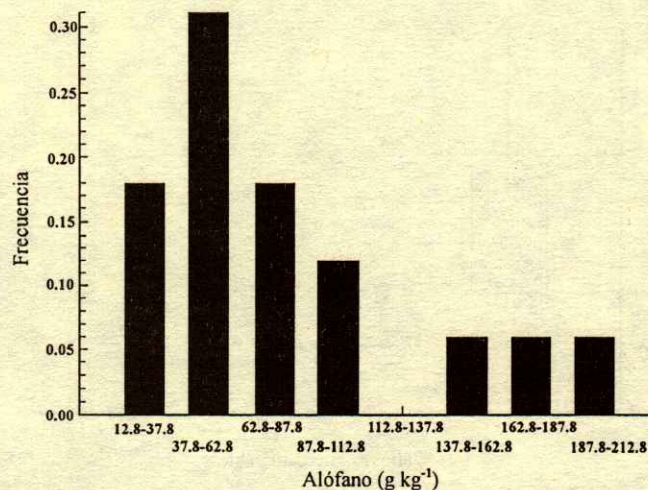


Figura 5. Distribución de frecuencias del contenido de alófono en los horizontes A.

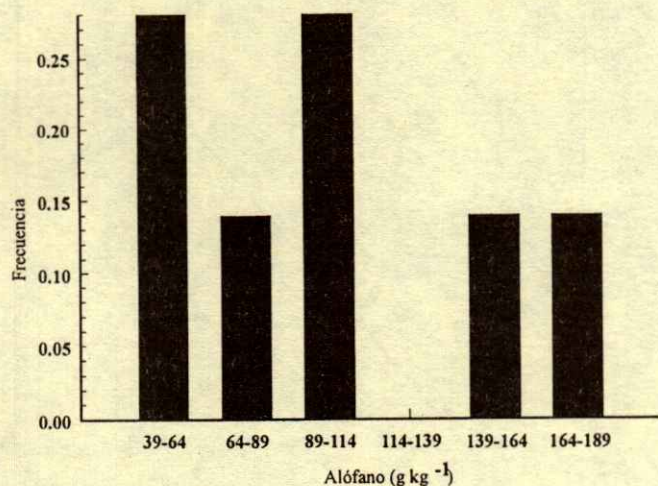


Figura 6. Distribución de frecuencias del contenido de alófono en los horizontes B.

afirmar que el Si_o en estos perfiles fue alto y muy alto. Así también, en los perfiles COF 12 y COF 22, los valores de Si_o fueron en su mayoría altos y muy altos; las cantidades variaron entre 0.4 y 3.2%, pero los valores superiores a 0.8% predominaron. El perfil COF 4 mostró las cantidades de Si_o más bajas; éstas variaron entre 0.25 y 0.87%. Las cantidades bajas de la ceniza volcánica originado por las condiciones de humedad (ústico/xérico) del lugar.

La Figura 7 presenta la relación que se establece entre el contenido de alófono y el Si_o en los horizontes A. La relación fue positiva y significativa ($P < 0.001$) y la ecuación generada fue la siguiente:

$$\text{Alófono} = 14.7 + 5.7 Si_o$$

Con base en el coeficiente de determinación y dentro de los límites de la ecuación, se puede aseverar que 84% de la variabilidad del alófono en los horizontes A es explicada por Si_o .

Los valores de pH, medido en NaF 1 M, superiores a 9.4, advierten la presencia de alófono y de complejos de sustancias orgánicas con aluminio. Sin embargo, aunque se sugiere realizar esta prueba en campo para reconocer suelos volcánicos (Spaargaren, 1994), los valores son cualitativos ya que muchos Espodosoles también reaccionan al NaF por la presencia de aluminio intercambiable y de sustancias no cristalinas, por lo que esta prueba no está considerada como criterio para identificar Andisoles (Parfitt y Saigusa, 1985; Leamy *et al.*, 1988; Ping *et al.*, 1989; Shoji *et al.*, 1993; Nizeyimana, 1997). En la mayoría de los perfiles

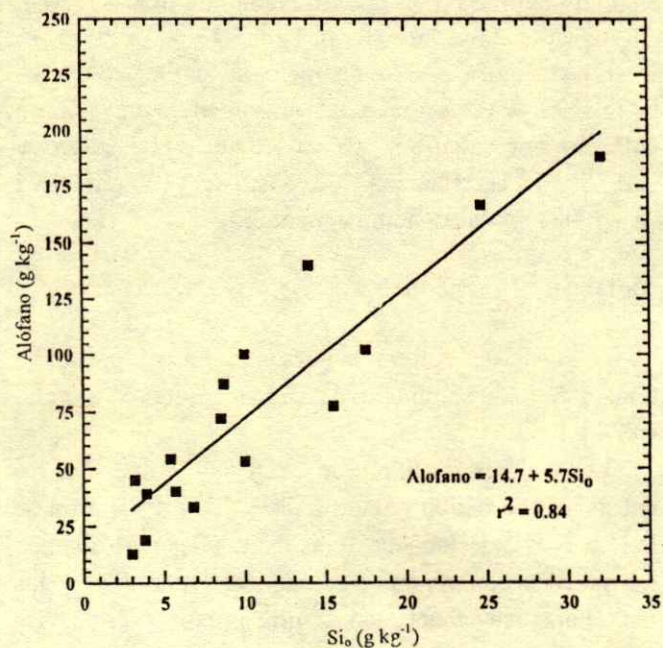


Figura 7. Relación entre el contenido de alófono y el silicio extraído con oxalato (Si_o) en los horizontes A.

analizados, los valores de pH_{NaF} fueron superiores a 9.4, sólo en COF 4, ubicado en ambiente más seco, presentó en los horizontes Bw valores entre 9.1 y 9.39. Los perfiles COF 26 y COF 17, situados en régimen de humedad perúdic, exhibieron los pH_{NaF} más altos, seguramente por la mayor actividad del ion

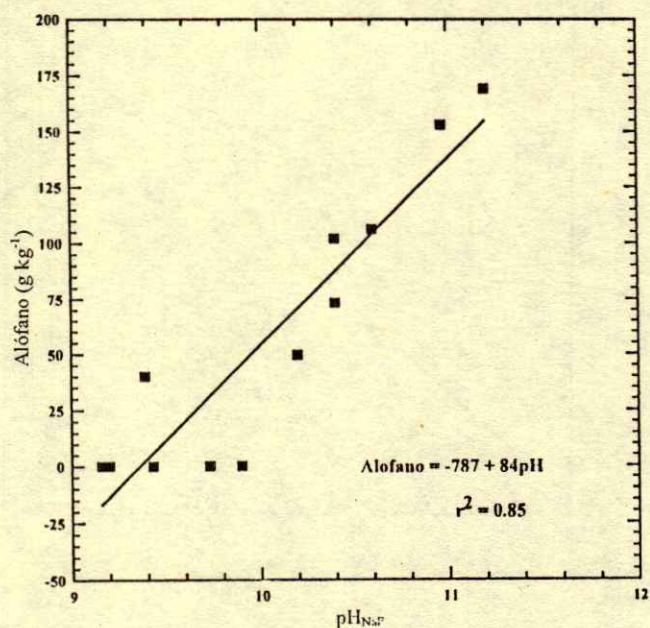


Figura 8. Relación entre el contenido de alófono y los valores de pH medido en NaF 1 M en los horizontes B.

aluminio expresada en la extracción con oxalato (Al_0), allí los valores oscilaron entre 10.9 y 11.3.

En la Figura 8 se muestra, para los horizontes B, la relación establecida entre el contenido de alófono obtenido por cálculo y los valores de pH medido en NaF 1 M. La relación fue positiva y significativa ($P < 0.001$), y la ecuación generada fue:

$$\text{Alófono} = -787 + 84\text{pH}, r^2 = 0.85.$$

De acuerdo con la ecuación anterior, por cada unidad de pH_{NaF} se incrementa el contenido de alófono en 84 g kg^{-1} .

Los valores de aluminio más la mitad del hierro extraídos con oxalato ácido ($Al_0 + 0.5Fe_0$) variaron de 0.23 a 6.7%, destacándose las cantidades más altas en los perfiles con régimen de humedad perúdic y las más bajas en aquél con régimen ústico/xérico. De acuerdo con Leamy *et al.* (1988) y Spaargeren (1994), en ($Al_0 + 0.5Fe_0$) se está considerando al aluminio y al hierro provenientes de alófono, de la imogolita y de la ferrihidrita, además del que está acomplejado en las sustancias húmicas. En las Figuras 9 y 10 se observó una relación lineal entre el alófono y ($Al_0 + 0.5Fe_0$) en los horizontes A y B, determinada por las ecuaciones:

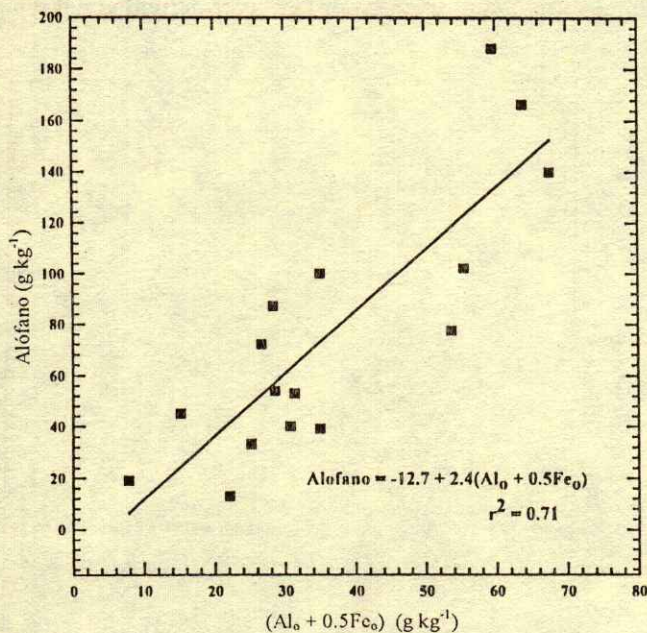


Figura 9. Relación entre el contenido de alófono y ($Al_0 + 0.5Fe_0$) en los horizontes A.

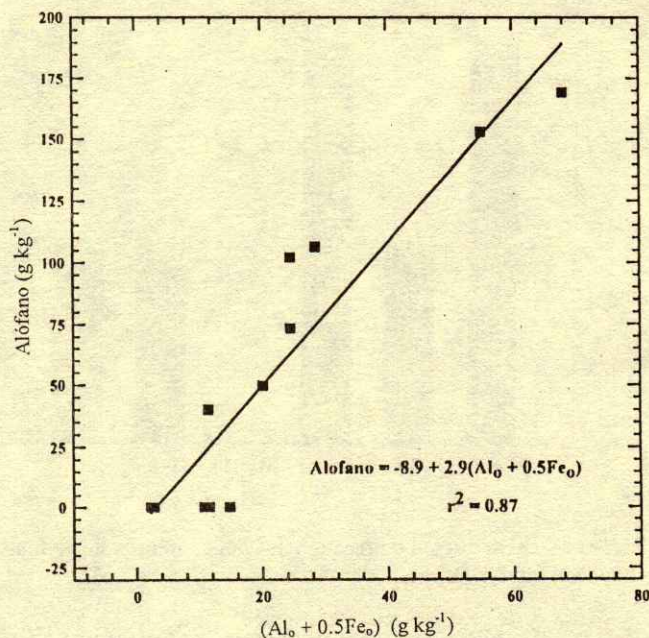


Figura 10. Relación entre el contenido de alófono y ($Al_0 + 0.5Fe_0$) en los horizontes B.

$$\text{Alófono} = -12.7 + 2.4(Al_0 + 0.5Fe_0) \text{ y}$$

$$\text{Alófono} = -8.9 + 2.9(Al_0 + 0.5Fe_0)$$

respectivamente. Con base en el coeficiente de determinación, 71 y 87% de la variabilidad del alófono en los horizontes A y B, respectivamente, es explicada por ($Al_0 + 0.5Fe_0$).

La retención de fósforo alta es también una característica de los Andisoles. En general, la cantidad de fósforo retenida por estos suelos está determinada por el contenido y las formas de aluminio y hierro activo. Los valores de la retención de fósforo fueron superiores a 85% en régimen de humedad perúdic y sólo en los horizontes B del COF 22 fue de 66%. En el perfil COF 4, situado en régimen ústico/xérico, la retención de fósforo fue inferior a 85% pero superior a 25%; en esas condiciones de humedad la alteración del material volcánico es más lenta y se manifiesta en el contenido bajo de aluminio activo (Al_0). La retención de fósforo se atribuye sobre todo a la presencia de aluminio activo proveniente de los complejos humus-aluminio del alófono y de la imogolita (Wada y Gunjigake, 1980; Wada, 1985; Shoji *et al.*, 1993; Madeira *et al.*, 1994). La retención de fósforo (Figura 11) en los horizontes B de los perfiles estudiados, sostuvo una relación lineal negativa con el $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ expresada por la ecuación:

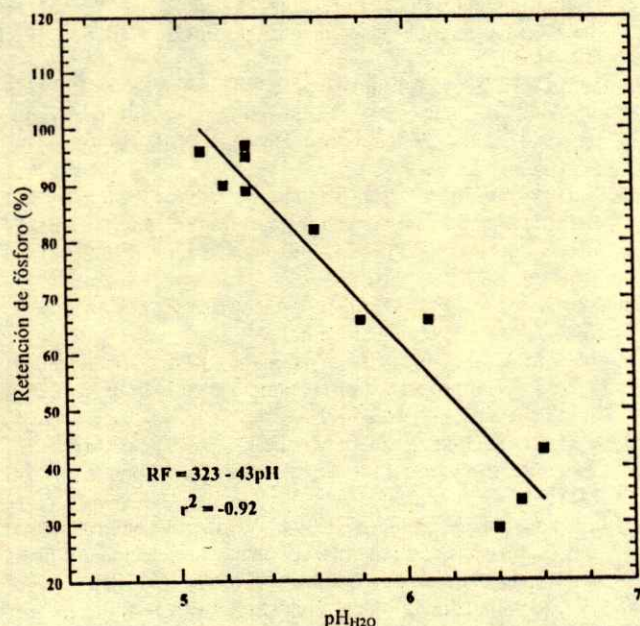


Figura 11. Relación entre la retención de fósforo y el pH medido en agua en los horizontes B.

$$RF = 323 - 43pH.$$

La Figura 11 muestra que la retención de fósforo depende del pH del sistema y sobre todo de la especie de ion de aluminio (Al^{3+}) que predomina. A pH superior a 6.0, la retención de fósforo es baja por la carga de superficie negativa que prevalece (Shoji *et al.*, 1993).

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación es producto del apoyo otorgado por CONACYT al proyecto 97-06-001-V. A la técnico Ninfa Portilla por el análisis químico de las muestras de suelo.

LITERATURA CITADA

- Bäumler, R. y W. Zech. 1994. Soils of the high mountain region of Eastern Nepal: Classification, distribution and soil forming processes. *Catena* 22: 85-103.
- Blakemore, L.C., P.L. Searle y B.K. Daly. 1987. Methods for chemical analysis of soils. New Zealand Soil Bureau Scientific Report 80. Department of Scientific and Industrial Research, New Zealand.
- Campos, A. y L. Cruz H.. 1996. Propiedades químicas de los Andisoles del volcán Cofre de Perote. Memorias del XXVII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Cd. Obregón, Sonora.
- Campos, A. y L. Cruz H. 1997. Estimación de alófono en suelos volcánicos de altitud del Cofre de Perote. pp. 50-51. *In:* Anuario. Instituto de Ecología, A.C. Jalapa, Ver.
- Cantagrel, J.M. y C. Robin. 1979. K-Ar dating on Eastern Mexican volcanic rocks: relations between the andesitic and the alkaline provinces. *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 5: 99-114.
- Cruz H., L. y A. Campos. 1997. Propiedades químicas y morfológicas de una secuencia de suelos con material volcánico de diferentes grados de alteración. *Terra* 15: 267-278.
- Chen Zueng-Sang, V.B. Asio y Dung-Feng Yi. 1999. Characteristics and genesis of volcanic soils along a toposequence under a subtropical climate in Taiwan. *Soil Sci.* 164: 510-525.
- Dubroeuq, D., A. Campos y D. Geissert. 1992. Comportamiento de los andosoles negros con respecto al agua en el volcán Cofre de Perote, Ver., México. *Terra* 10: 51-58.
- Leamy, M.L., B. Clayden, R.L. Parfitt, D.I. Kinloch y C.W. Childs. 1988. The Andisol proposal. Final proposal of the International Committee on the Classification of Andisols (ICOMAND). New Zealand Soil Bureau, Low Hutt, New Zealand.
- Madeira, M., A. Furtado, E. Jeanroy y A.J. Herbillon. 1994. Andisols of Madeira Island (Portugal). Characteristics and classification. *Geoderma* 62: 363-383.
- Maeda, T., H. Takenaka y B.P. Warkentin. 1977. Physical properties of allophane soils. *Adv. Agron.* 29: 229-264.
- Malucelli, F., F. Terribile y C. Colombo. 1999. Mineralogy, micromorphology and chemical analysis of andosols on the Island of Sao Miguel (Azores). *Geoderma* 88: 73-98.
- Mehra, O.P. y M.L. Jackson. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clay and Clay Min.* 7th Conf.: 317-327.
- Mizota, C. y J. Chapelle. 1988. Characterization of some Andepts and andic soils in Rwanda, Central Africa. *Geoderma* 41: 193-209.
- Mizota C. y L.P. van Recuwijk. 1989. Clay mineralogy and chemistry of soil formed in volcanic material in diverse climate regions. *Soil Monograph* 2. ISRIC, Wageningen, The Netherlands.
- Narave, F.H. 1985. La vegetación del Cofre de Perote, Ver. México. *Biotica* 10: 35-64.
- Negendank, J.F.W., R. Einmermann, R. Krawczyk, F. Mooser, H. Tobschall y D. Werle. 1985. Geological and geochemical investigations on the Eastern Transmexican volcanic belt. *Geof. Intern.* 24: 477-575.
- Nizeyimana, E. 1997. A toposequence of soils derived from volcanic materials in Rwanda: Morphological, chemical and physical properties. *Soil Sci.* 162: 350-360.
- Nizeyimana, E., T.J. Bicki y P.A. Agbu. 1997. An assessment of colloidal constituents and clay mineralogy of soils derived from volcanic materials along a toposequence in Rwanda. *Soil Sci.* 162: 361-371.
- Parfitt, R.L. 1980. Chemical properties of variable charge soils. pp. 87-107. *In:* B.K.G. Theng (ed.). Soils with variable charge. N.Z. Soc. Soil Sci. Bureau, Dep. Sci. Ind. Res. Lower Hutt, New Zealand.
- Parfitt, R.L. 1990. Allophane in New Zealand: a review. *Aust. J. Soil Res.* 28: 343-360.
- Parfitt, R.L. y J.M. Kimble. 1989. Conditions for formation of allophane in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 971-977.

- Parfitt, R.L. y M. Saigusa. 1985. Allophane and humus-aluminum in Spodosols and Andepts formed from the same volcanic rock beds in New Zealand. *Soil Sci.* 139: 149-155.
- Parfitt, R.L. y A.D. Wilson. 1985. Estimation of allophane and halloysite in three sequences of volcanic soils, New Zealand. *In: E. Fernandez Caldas y D.H. Yaalon (eds.). Volcanic soils. Catena Suppl.* 7: 1-8.
- Parfitt, R.L., M. Russell y G.E. Orbell. 1983. Weathering sequence of soils from volcanic ash involving allophane and halloysite. *Geoderma* 29: 41-57.
- Parfitt, R.L., M. Saigusa y J.D. Cowie. 1984. Allophane and halloysite formation in a volcanic ash under different moisture conditions. *Soil Sci.* 138: 360-364.
- Parfitt, R.L., C.W. Childs y D.N. Eden. 1988. Ferrihydrite and allophane in four Andepts from Hawaii and implications for their classification. *Geoderma* 41: 223-241.
- Ping, C.L., S. Shoji y T. Ito. 1988. Properties and classification of three volcanic ash-derived pedons from Aleutian Islands and Alaska. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 455-462.
- Ping, C.L., S. Shoji, T. Ito, T. Takahashi y J.P. Moore. 1989. Characteristics and classification of volcanic-ash-derived soils in Alaska. *Soil Sci.* 148: 8-29.
- Quantin, P., B. Dubin, A. Bouleau, L. Lulli y D. Bidini. 1985. Characteristics and genesis of two Andosols in Central Italy. pp. 9-16. *In: E.F. Caldas y D.H. Yaalon (eds.). Volcanic soils. Weathering and landscape relationships of soils on tephra and basalt. Catena-Verlag, Braunschweig. Cremlin-Destedt, West Germany,*
- Shoji, S. 1988. Separation of melanic and fulvic Andosols. *Soil Sci. Plant Nutr.* 34: 303-306.
- Shoji, S. y Y. Fujiwara. 1984. Active aluminum and iron in humus horizons of Andosols from Northeastern Japan: Their forms, properties and significance in clay weathering. *Soil Sci.* 137: 216-226.
- Shoji, S. y T. Ono. 1978. Physical and chemical properties and clay mineralogy of andosols from Kitakami, Japan. *Soil Sci.* 126: 297-312.
- Shoji, S., T. Kurebayashi e I. Yamada. 1990. Growth and chemical composition of Japanese Pampas grass (*Miscanthus sinensis*) with special reference to the formation of dark-colored Andisols in Northeastern Japan. *Soil Sci. Plant Nutr.* 36: 105-120.
- Shoji, S., M. Nanzyo y R.A. Dahlgren. 1993. Volcanic ash soil: Genesis, properties and utilization. *Developments in Soil Science* 21. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Shoji, S., M. Nanzyo, R.A. Dahlgren y P. Quantin. 1996. Evaluation and proposed revisions of criteria for Andosols in the world reference base for soil resources. *Soil Sci.* 161: 604-615.
- Smith, G.D. 1978. A preliminary proposal for the reclassification of Andepts and some andic subgroups (The Andisol proposal). New Zealand Soil Bureau, DSIR, Lower Hutt, New Zealand.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil survey. USDA-NRCS, Agric. Handb. 436. 2nd ed. US Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Spaargaren (ed.). 1994. World reference base for soil resources. ISRIC/FAO, Wageningen/Rome.
- Supriyo, H., N. Matsue y N. Yoshinaga. 1992. Chemical and mineralogical properties of volcanic ash soils from Java. *Soil Sci. Plant Nutr.* 38: 443-457.
- Tait, J.M., N. Yoshinaga y B.D. Mitchell. 1978. The occurrence of imogolite in some Scottish soils. *Soil Sci. Plant Nutr.* 24: 141-151.
- Ugolini, F.C. y R.A. Dahlgren. 1991. Weathering environmental and occurrence of imogolite/allophane in selected Andisols and Spodosols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 1166-1171.
- Wada, K. 1980. Mineralogical characteristics of Andosols. pp. 87-107. *In: B.K.G. Theng (ed.). Soils with variable charge. N. Z. Soc. Soil Sci. Bureau, Dept. Scient. Ind. Res. Lower Hutt, New Zealand*
- Wada, K. 1985. The distinctive properties of Andisols. *Adv. Soil Sci.* 2: 173-229.
- Wada, K. 1989. Allophane and imogolite. pp. 1051-1081. *In: G.B. Dixon y S.B. Wedd (eds.). Minerals in soil environments. SSSA, Madison, WI.*
- Wada, K. y N. Gunjigake. 1980. Active aluminum and iron and phosphate adsorption in Ando soils. *Soil Sci.* 128: 331-336.
- Wada, K., Y. Kakuto y F.N. Muchena. 1987. Clay minerals and humus complexes in five Kenyan soils derived from volcanic ash. *Geoderma* 39: 307-321.
- Warkentin, B.P., T. Maeda y K. Soma. 1988. Physical characteristic for classification of Andisol. pp. 1-20. *In: D.I. Kinloch, S. Shoji, F.H. Beinroth y H. Eswaran (eds.). Proc. 9th Int. Soil Classification Workshop, Japan, 20 July to 1 August, 1987.*
- Yáñez, G.C. y S. García D. 1982. Exploración de la región geotérmica los Humeros – las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz. Comisión Federal de Electricidad, México.

EFECTO DE N, P y K EN PLANTAS DE CHILE JALAPEÑO INFECTADAS CON EL VIRUS JASPEADO DEL TABACO¹

Effect of N, P, and K on Jalapeño Pepper Plants Infected with Tobacco Etch Virus

V.A. Velasco Velasco², G. Alcántar González³, P. Sánchez García³, E. Estañol Botello⁴, E. Zavaleta Mejía⁴, E. Cárdenas Soriano⁴, R. Rodríguez Montessoro⁴ y A. Martínez Garza⁵

RESUMEN

En plantas de chile jalapeño (*Capsicum annuum* L.), cultivar M, inoculadas con el virus jaspeado del tabaco (TEV) y en condiciones de hidroponía, se estudió el efecto de los nutrimentos N, P y K sobre la tolerancia al TEV. Se encontró que la expresión de los síntomas aumentó gradualmente al incrementar el suministro de N y P, en cambio, con el K, los síntomas disminuyeron. Las mayores concentraciones del TEV se alcanzaron con las dosis intermedias de los nutrimentos N y K y la dosis menor de P, esto es, 3.05 mg g⁻¹ de tejido con 12 me N L⁻¹, 3.03 mg g⁻¹ de tejido con 7 me K L⁻¹ y 2.83 mg g⁻¹ de tejido con 0.5 me P L⁻¹. Con el suministro de dosis crecientes de N y P, las plantas sanas e inoculadas incrementaron el contenido de clorofila, la producción de frutos frescos y la producción de materia seca total (hojas, tallos, raíces y frutos), y con dosis crecientes de K estas variables disminuyeron. Las plantas inoculadas, que recibieron un adecuado suministro nutrimental, mostraron una producción satisfactoria, no obstante, que la expresión de síntomas y la concentración del TEV también se favoreció, es decir, la planta toleró al virus.

Palabras clave: *Capsicum annuum*, *nutrición*, *TEV*, *virosis*.

¹ El presente trabajo forma parte del proyecto CONACYT "Nutrición de Cultivos" G0009B.

² Centro de Investigación y Graduados Agropecuarios del Instituto Tecnológico Agropecuario. Ex Hacienda de Nazareno, 68000 Xoxocotlán, Oaxaca, México. vicentvelascov@latinmail.com

³ Instituto de Recursos Naturales, ⁴Instituto de Fitopatología y Entomología, ⁵Instituto de Socioeconomía e Informática. Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Edo. de México.

Recibido: Abril de 1999. Aceptado: Mayo de 2001.
Publicado en Terra 19: 117-125.

SUMMARY

Jalapeño pepper (*Capsicum annuum* L.) plants cv. M, grown under hydroponics, were inoculated with the tobacco etch virus (TEV), and the effect of the N, P, and K nutrients on tolerance to TEV was studied. It was found that the expression of the symptoms increased gradually with increased N and P supply, while with K the symptoms diminished. The highest concentrations of TEV were reached with intermediate dosages of the nutrients N and K and the smallest dosage of P: 3.05 mg g⁻¹ of tissue with 12 me N L⁻¹, 3.03 mg g⁻¹ of tissue with 7 me K L⁻¹, and 2.83 mg g⁻¹ of tissue with 0.5 me P L⁻¹. With increasing dosages of N and P, the healthy inoculated plants increased their chlorophyll content, fresh fruit yield and total dry biomass production (leaves, stems, roots, and fruits); with increasing levels of K, these variables decreased. The inoculated plants that received an adequate supply of nutrients had satisfactory production even though the expression of symptoms and the concentration of TEV were also favored, meaning that the plant tolerated the virus.

Index words: *Capsicum annuum*, *nutrition*, *TEV*, *viruses*.

INTRODUCCION

Los efectos de los nutrimentos N, P y K sobre la resistencia a las enfermedades se han estudiado ampliamente, debido a su limitada disponibilidad en muchos suelos y a la gran cantidad requerida de ellos por las plantas (Huber, 1980, 1981). Las funciones limitativas de los micronutrimentos en las reacciones metabólicas relacionadas con la resistencia a las enfermedades, principalmente virales, aún no se han determinado (Marschner, 1995). Sin embargo, Graham (1983), refiriéndose a los elementos traza y algunos otros (Li, Cr, Ni, Pb, F, Si, Cd, Al), menciona que el

estudio de sus efectos sobre las enfermedades permitirá descubrir mecanismos de resistencia en las plantas, lo cual podría considerarse como una forma de control biológico.

El ambiente nutrimental que provee el vegetal hospedante es especialmente crítico para los parásitos obligados. Los excesos y deficiencias minerales reducen el crecimiento vegetativo y pueden reducir la concentración de virus en los tejidos; por lo tanto, los períodos más intensos para la multiplicación de virus pueden corresponder a la máxima deficiencia de proteínas en el tejido de las plantas, debido a que los virus se apropian de los nutrimentos preferenciales del hospedante. La suma de interacciones de factores en el patógeno, hospedante, ambiente y el tiempo, determina cómo una planta enferma es afectada por la nutrición (Huber, 1980).

La multiplicación de los virus es confinada a células vivas y sus requerimientos nutrimentales son restringidos principalmente a aminoácidos y nucleótidos. En general, los factores nutrimentales que favorecen el crecimiento de la planta hospedante, también favorecen la multiplicación viral (Marschner, 1995).

El tipo de nutrición de las plantas, infectadas por virus, ha mostrado un efecto marcado en la expresión de estos patógenos. La multiplicación del virus depende del sistema enzimático de la planta. Por consecuencia, es necesario entender los mecanismos a través de los cuales los nutrimentos afectan los procesos metabólicos de las plantas sanas e infectadas por virus (Kaplan y Bergman, 1985). El objetivo de este trabajo fue determinar los niveles crecientes de los nutrimentos N, P y K en plantas de chile jalapeño inoculadas con el virus jaspeado del tabaco.

MATERIALES Y METODOS

El presente estudio se realizó en condiciones de hidroponía con circuito cerrado y subirrigación, en el invernadero del Colegio de Postgraduados, Montecillo, estado de México.

Material Biológico y Condiciones Climáticas del Experimento

Se trabajó con plantas de chile jalapeño, cultivar M (Petoseed). Las semillas se obtuvieron en una casa comercial y su germinación fue de 94%. El almácigo

se estableció en charolas de poliuretano, con agrolita como sustrato, colocando dos semillas en cada cavidad (3 x 3 cm) de la charola. A los 30 días de emergidas las plantas, se colocaron en recipientes de plástico, de 6 L de capacidad, conteniendo como sustrato roca volcánica roja, conocida localmente como tezontle (pumicita), previamente lavada, con granulometría de 0.5 a 1.0 cm de diámetro. En el invernadero, la temperatura máxima durante el día fue de 30 ± 3 °C y en la noche de 16 ± 3 °C.

Solución Nutritiva

Se utilizó la solución nutritiva universal de Steiner (1968), cuya composición química es: NO_3^- , 12 me L^{-1} ; H_2PO_4^- , 1 me L^{-1} ; SO_4^{2-} , 7 me L^{-1} ; K^+ , 7 me L^{-1} ; Ca^{2+} , 9 me L^{-1} y Mg^{2+} , 4 me L^{-1} .

Los reactivos empleados para preparar las soluciones nutritivas de los macroelementos en sus diferentes dosis fueron: $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, KNO_3 , K_2SO_4 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, KH_2PO_4 , CaCl_2 , HNO_3 , NH_4NO_3 , $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, KOH y $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. La mezcla de micronutrimentos, empleados para completar las soluciones nutritivas, estuvo compuesta por: H_3BO_3 , 2.88 g L^{-1} ; $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, 1.81 g L^{-1} ; $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, 0.22 g L^{-1} ; $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, 0.18 g L^{-1} y $\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 0.02 g L^{-1} . Al preparar las soluciones nutritivas se adicionó 1 mL L^{-1} de la mezcla de micronutrimentos en la solución y 1 mL de Fe-EDTA (Hewitt, 1966).

Los riegos se efectuaron por subirrigación cada tercer día. Antes del riego, cada solución nutritiva se aforó al nivel inicial (6 L) y se ajustó el pH a 5.5 ± 0.1 con H_2SO_4 2 N. Dichas soluciones se renovaron cada dos semanas. Se usó agua corriente de los invernaderos con el siguiente análisis físico-químico: pH, 7.7; CE, 0.97 dS cm^{-1} ; Ca^{2+} , 2.29 me L^{-1} ; Mg^{2+} , 1.09 me L^{-1} ; Na^+ , 4.36 me L^{-1} ; K^+ , 0.29 me L^{-1} ; CO_3^{2-} , 0 me L^{-1} ; HCO_3^- , 6.53 me L^{-1} ; Cl^- , 1.44 me L^{-1} ; y SO_4^{2-} , 0.04 $\mu\text{g mL}^{-1}$.

Tratamientos

Los factores y niveles estudiados fueron: virus (sin TEV y con TEV), NO_3^- (6.0, 12.0 y 18.0 me L^{-1}), H_2PO_4^- (0.5, 1.0 y 1.5 me L^{-1}) y K^+ (3.5, 7.0 y 10.5 me L^{-1}). A partir de la solución de Steiner, se realizaron variaciones de 50% (superior e inferior) en la concentración de N, P y K. El experimento generó

un factorial 2x3x3x3 igual a 54 tratamientos enmarcados en un diseño completamente aleatorio, con tres repeticiones, resultando un total de 162 unidades experimentales. Cada unidad experimental consistió de un recipiente (6 L de capacidad) con una planta de chile jalapeño.

Inoculación

El inóculo del virus jaspeado del tabaco (TEV) se obtuvo del Laboratorio de Virus Fitopatógenos de la Especialidad de Fitopatología del Colegio de Postgraduados.

Las inoculaciones se realizaron 20 días después del trasplante. En un mortero con pistilo, se maceraron 3 g de tejido seco de *Datura stramonium* infectado con TEV, mezclado con 3 mL de solución amortiguadora (solam) de fosfato 0.01 M y pH 7.0 (Matthews, 1991; Pinto, 1992). El macerado se inoculó mecánicamente con un hisopo de algodón en las hojas cotiledonales y en dos hojas jóvenes de la planta, previamente espolvoreadas con carborundum (malla 600) como abrasivo. Se trabajó con plantas inoculadas y no inoculadas, y a estas últimas se les identificó como plantas sanas.

Variables Evaluadas

Expresión de síntomas y concentración del TEV. La severidad de los síntomas foliares se evaluó con una escala arbitraria de 1 a 4, donde: 1 = sin síntomas; 2 = síntomas débiles, mosaico (áreas verdes y oscuras) afectando la mitad de las hojas; 3 = síntomas intermedios, mosaico bien definido en toda la hoja y algunas distorsiones (ondulaciones); 4 = síntomas intensos, con distorsión foliar y achaparramiento de la planta. La severidad se evaluó en el primer corte de frutos (90 días después de la inoculación).

En las plantas de chile jalapeño, inoculadas con el TEV, que recibieron los diferentes tratamientos nutrimentales, se determinó la concentración del virus. Con plantas infectadas de *Nicotiana tabacum* var. Samsun, se realizó la purificación del virus y se elaboró la curva patrón de titulación; se determinó la concentración con la fórmula: concentración del TEV (mg mL^{-1}) = $A_{260} \times \text{dilución} / 2.4$, (donde: A_{260} = densidad óptica a 260 nm; dilución = factor de

dilución considerado en la lectura; 2.4 = coeficiente de extinción, mg mL^{-1} del TEV) (Estañol *et al.*, 1995). Posteriormente, se efectuó la prueba de DAS-ELISA (double antibody sandwich-enzyme linked immunosorbent assay), descrita por Clark y Adams (1976, 1977), en cada planta de chile jalapeño (dos hojas de la parte superior), y con las lecturas de absorbencia obtenidas (Minireader II, Dynatech Laboratories, Inc.), se extrapolaron en la curva de titulación, para determinar la concentración del TEV.

Contenido de clorofila. Con el medidor de clorofila "Minolta SPAD-502", se tomaron lecturas en hojas de la parte superior de cada planta, 70 días después de la inoculación. Se utilizaron hojas situadas a una misma altura y posición de las plantas. Una lectura por planta estuvo compuesta de dos observaciones y cada observación consistió del promedio de tres valores registrados en una hoja.

Producción de frutos. Se realizaron dos cortes de frutos cuando éstos alcanzaron su madurez comercial: el primero a 110 días y el segundo a 124 días después del trasplante. Se registró el peso por unidad experimental.

Producción de materia seca. Después de la última cosecha de frutos, se cortaron las plantas, separando las hojas, tallos, raíces y frutos. Se pesó cada órgano en estado fresco, posteriormente, el material etiquetado se colocó en una estufa con circulación de aire forzado a 65 °C por 72 h, y por diferencia de peso se obtuvo el peso seco.

Determinación de N, P y K. El análisis nutrimental se realizó en todas las hojas, tallos, raíces y frutos de cada planta. El N-total se determinó por el método de microkjeldahl (Brearen y Mulvaney, 1982); el P y K por el método de digestión triácida convencional (Alcántar y Sandoval, 1999) y las concentraciones se determinaron por espectrometría de emisión en un equipo ICP-Plasma 96 (VARIAN).

Análisis Estadístico

Se realizaron análisis de varianza para el diseño completamente aleatorio y arreglo de tratamientos de acuerdo con las variables de respuesta analizadas. Posteriormente, se realizaron pruebas de medias (Duncan, $\alpha = 0.05$) (Martínez, 1988).

RESULTADOS

Expresión de Síntomas y Concentración del TEV en las Plantas

Las plantas de chile jalapeño inoculadas con el TEV mostraron áreas verdes y amarillas en las hojas y una marcada deformación de las mismas (enchinamiento). El análisis de varianza y la prueba de medias de Duncan no indicaron efectos significativos ($\alpha = 0.05$) en la expresión de síntomas y en la concentración del virus en cada tratamiento

nutricional. Por esta razón, los resultados se muestran por nivel de cada nutrimento estudiado (N, P y K).

Aun cuando no hubo diferencia estadística, se observó que los síntomas aumentaron gradualmente al aumentar la dosis de N y P, en cambio, con el K, la expresión de síntomas disminuyó (Figura 1).

Las mayores concentraciones del TEV se alcanzaron con las dosis intermedias de los nutrimentos N y K y la dosis menor de P (Figura 2), esto es, 3.05 mg g^{-1} de tejido con 12 me N L^{-1} , 3.03 mg g^{-1} de tejido con 7 me K L^{-1} y 2.83 mg g^{-1} de tejido con 0.5 me P L^{-1} .

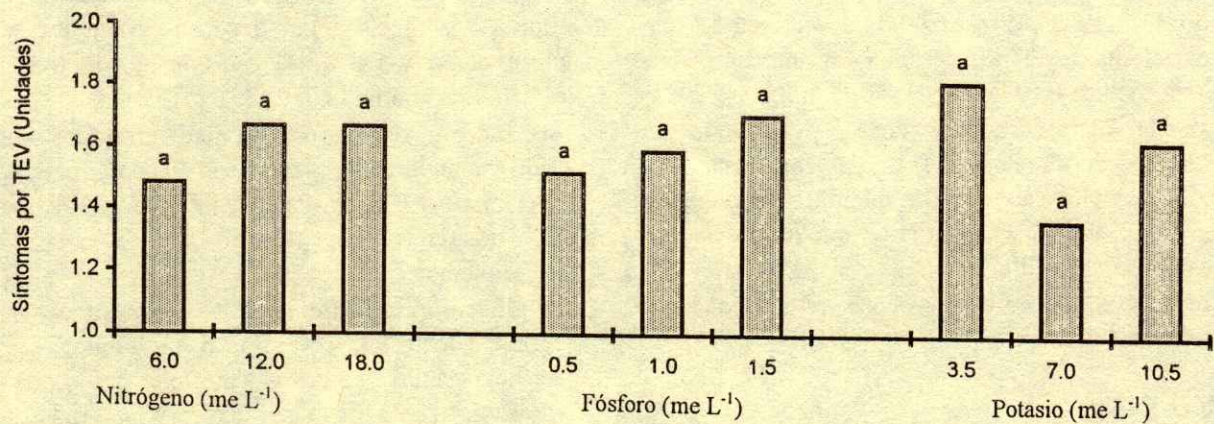


Figura 1. Efecto de dosis crecientes de N, P y K en la expresión de síntomas del TEV en plantas de chile jalapeño a los 90 días después de la inoculación. Barras con la misma letra son estadísticamente iguales (Duncan $\alpha = 0.05$) dentro de cada nutrimento. (Promedio de 27 dosis para plantas inoculadas con tres repeticiones que equivalen a 81 datos).

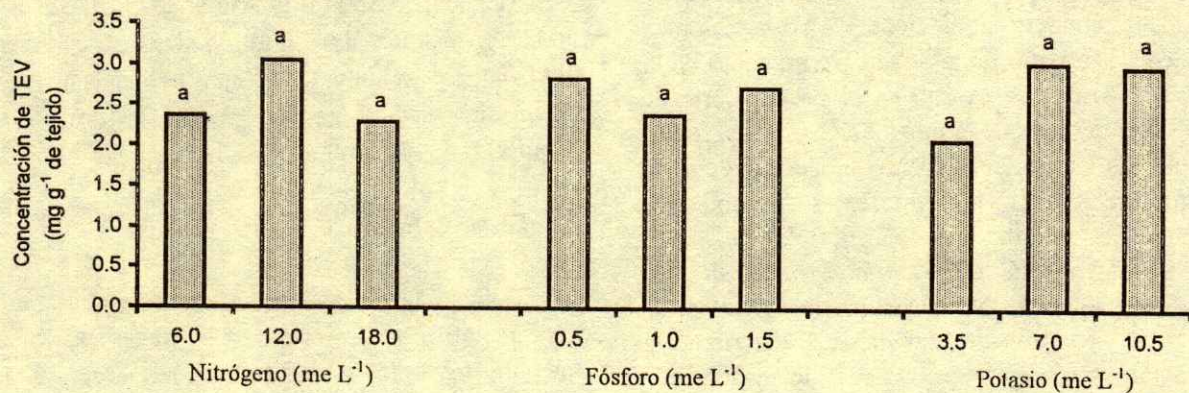


Figura 2. Efecto del N, P y K en la concentración del TEV en plantas de chile jalapeño. Barras con la misma letra son estadísticamente iguales (Duncan $\alpha = 0.05$) dentro de cada nutrimento. (Promedio de 27 dosis para plantas inoculadas con tres repeticiones que equivalen a 81 datos).

Contenido de Clorofila, Producción de Frutos Frescos y Materia Seca Total

El análisis de varianza para el contenido de clorofila mostró diferencias altamente significativas ($\alpha = 0.05$) para los factores N, P, Virus y la interacción NK; en la producción de frutos frescos la significancia ($\alpha = 0.05$) se observó con N, P, K, Virus y las interacciones NK y NK Virus; y para la variable producción de materia seca total, las significancias ($\alpha = 0.05$) se mostraron en N, P, P Virus y la interacción NP y NK. Las pruebas de medias de Duncan ($\alpha = 0.05$) mostraron diferencias significativas entre los efectos de las dosis nutrimentales. Sin embargo, los resultados se presentan por nivel de nutriente N, P y K.

Las plantas de chile jalapeño sanas e inoculadas con el TEV mostraron la misma tendencia de incrementos en el contenido de clorofila (Figura 3a), producción de frutos frescos (Figura 3b) y producción de materia seca total (Figura 3c) cuando se suministraron dosis crecientes de N y P, en cambio, estas mismas variables disminuyeron con las dosis crecientes de K. Los niveles 18 y 3.5 me L⁻¹ de N y K, respectivamente, afectaron de manera significativa (Duncan $\alpha = 0.05$) el contenido de clorofila entre las plantas sanas e inoculadas (Figura 3a); los valores 1.5 y 7 me L⁻¹ de P y K, respectivamente, no tuvieron un efecto significativo (Duncan $\alpha = 0.05$) en la producción de frutos frescos entre ambos tipos de plantas, en los demás valores de los nutrientes sí hubo significancia (Duncan $\alpha = 0.05$) (Figura 3b); la producción de materia seca total entre ambos tipos de plantas, se afectó de manera significativa (Duncan $\alpha = 0.05$) por los niveles de los tres elementos (Figura 3c).

Las plantas sanas siempre mostraron valores más altos en el contenido de clorofila, que las plantas inoculadas en todos los niveles de nutrientes probados. En general, la presencia del TEV se asoció con decrementos significativos (Duncan $\alpha = 0.05$) de 2.40% en el contenido de clorofila, 14.02% en la producción de frutos frescos y 15.55% en la producción de materia seca total (Cuadro 1). Con las dosis 18.0, 1.5 y 3.5 me L⁻¹ de N, P y K, respectivamente, se obtuvieron los mayores valores en el contenido de clorofila, producción de frutos frescos y materia seca total en plantas inoculadas. A diferencia

de las dosis 12.0, 1.0 y 3.5 me L⁻¹ de N, P y K, respectivamente, que son las dosis tomadas como tratamiento testigo, por ser las dosis indicadas en la solución universal de Steiner (1968); con estas últimas dosis, los valores de las variables mencionadas fueron menores que con las primeras dosis, aunque en forma no significativa.

Contenido de N, P y K en la Planta

El gradiente de concentración de nutrientes en los órganos de las plantas sanas fue: hojas > frutos > raíces > tallos para N y K; y frutos > hojas > raíces > tallos para P; los tallos presentaron el menor contenido de N, P y K. Por otro lado, el gradiente de concentración para plantas inoculadas con el TEV fue: hojas > frutos > tallos > raíces para N; frutos > hojas > tallos > raíces para P; y hojas > tallos > frutos > raíces para K (Cuadro 2).

El contenido de N, P y K en las hojas, raíces y frutos de las plantas sanas fue significativamente mayor que en las plantas inoculadas, a excepción del P en las hojas y raíces donde ambos tipos de plantas mostraron contenidos similares de este elemento. Para el caso de tallo, el mayor contenido de N, P y K siempre correspondió a plantas inoculadas con TEV (Cuadro 2). Las diferencias fueron en algunos casos significativas (Duncan $\alpha = 0.05$), dependiendo del órgano de la planta y del nutriente.

La acumulación total de materia seca (hojas, tallos, raíces y frutos) y la concentración de los nutrientes N, P y K fue mayor en las plantas inoculadas que en las sanas; estas diferencias sólo mostraron significancia (Duncan $\alpha = 0.05$) para P y K (Cuadro 2).

DISCUSION

Los resultados obtenidos en este trabajo sobre la expresión de síntomas del TEV en plantas de chile jalapeño, en relación con las concentraciones de los nutrientes N y P (Figura 1) son semejantes a los de otros cultivos con otras virosis. Kotuc y Vanek (1992) encontraron que el exceso de N y P incrementa los síntomas del virus del enrollamiento de la hoja en plantas de vid (GFLV). Asimismo, en plantas de maíz, infectadas con el virus del mosaico y enanismo del maíz (MDMV-A), se ha observado el mismo efecto

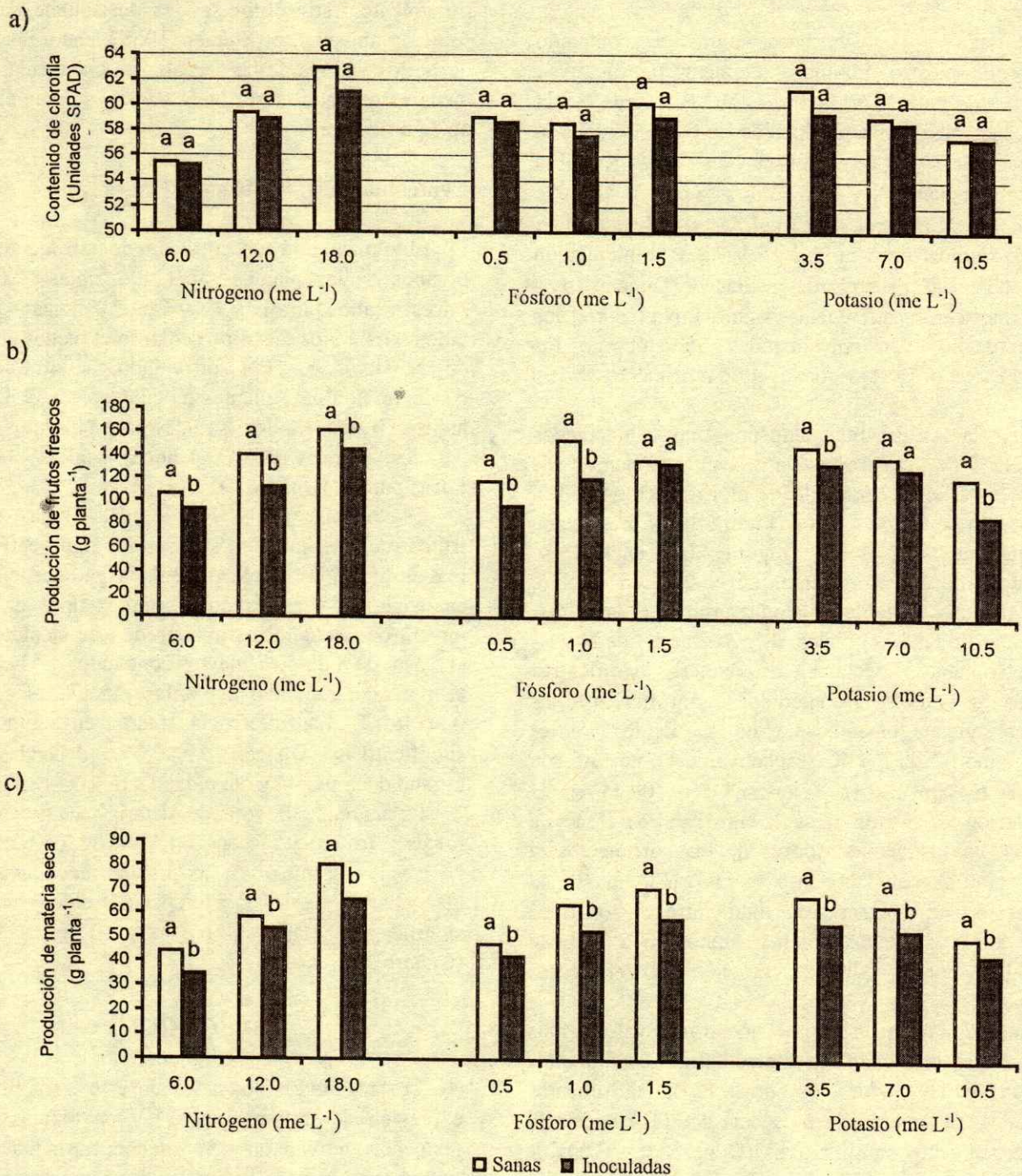


Figura 3. Efecto del nitrógeno, fósforo y potasio en: a) contenido de clorofila, b) producción de frutos frescos y c) producción de materia seca en plantas de chile jalapeño sanas e inoculadas con el virus jaspeado del tabaco (TEV). Barras con la misma letra son estadísticamente iguales (Duncan $\alpha = 0.05$) dentro de cada dosis de nutrimento. (Promedio de 27 dosis para plantas sanas o inoculadas con tres repeticiones que equivalen a 81 datos).

Cuadro 1. Contenido de clorofila, producción de frutos frescos y biomasa seca total de plantas de chile jalapeño sanas e inoculadas con el virus jaspeado del tabaco (TEV). (Promedio de 27 dosis para plantas sanas o inoculadas con tres repeticiones que equivalen a 81 datos).

Plantas	Clorofila	Frutos frescos	Materia seca
	unidades SPAD	g planta ⁻¹	
	*	**	**
Sanas	59.225 a	135.573 a	60.838 a
Inoculadas	57.806 b	116.559 b	51.376 b

Valores con la misma letra en columna son estadísticamente iguales (Duncan $\alpha = 0.05$) dentro de cada variable.

* significativa a 5%; ** significativa a 1%.

con diferentes concentraciones de N (Gaborjanyi *et al.*, 1992).

Con las dosis intermedias de los nutrimentos N, P y K (12.0, 1.0 y 7.0 me L⁻¹, respectivamente) se obtuvo la mayor concentración del TEV en las plantas de chile jalapeño (Figura 2). Quizás las dosis menores no cubrieron la demanda para la replicación del virus, o las mayores causaron alguna limitación para su replicación. Dado que el TEV está formado por 95% de proteínas y una cadena de RNA que equivale a 5% (Goodman *et al.*, 1986; Brunt *et al.*, 1990), y que las proteínas contienen de 15 a 18% de N en su estructura y el RNA está compuesto por la cadena de ortofosfatos, azúcares y bases nitrogenadas (Conn y Stumpf, 1982), es claro que el N y el P son esenciales para la replicación del virus.

Aun cuando la mayor expresión de síntomas se alcanzó con las altas dosis de N y P y la menor con K, y la mayor concentración del TEV con las dosis intermedias de los nutrimentos N, P y K, existió una correlación de 0.72 entre la concentración viral y la expresión de síntomas. Al respecto, Gaborjanyi *et al.*

(1992) encontraron que la aparición de los síntomas en maíz es altamente correlacionada con la concentración del virus MDMV-A. Por su parte, Van Loon (1987) y Zavaleta-Mejía (1999, comunicación personal) mencionaron que, en general, no siempre hay una correlación entre el nivel de multiplicación del virus y la severidad de los síntomas. Esto debido a que la mayor o menor concentración de virus puede darse antes, durante o después de la aparición de los síntomas.

Las plantas sanas siempre mostraron valores mayores en contenido de clorofila, producción de frutos frescos y producción de biomasa seca total que las plantas inoculadas. Posiblemente, lo anterior se debe a daños en los cloroplastos, además que la expresión de síntomas y la concentración del TEV en las plantas afectaron estas variables (Campillo *et al.*, 1981; Tschen *et al.*, 1983; Green y Kim, 1991; Hong y Shi, 1991; Hernández *et al.*, 1992; Black *et al.*, 1993; González, 1996; Velasco *et al.*, 1998). Las plantas inoculadas incrementaron el contenido de clorofila, la producción de frutos frescos y la producción de biomasa seca total en la medida que se incrementó el N y P, lo que significa que aun con la presencia del TEV, las plantas aprovecharon a estos elementos y éstos, a su vez, están aportando cierta tolerancia contra el virus. Caso contrario, con el suministro de K; estas variables disminuyeron.

La disminución del contenido de clorofila asociado con el TEV, pudo deberse a que los cloroplastos son afectados en su morfología externa, desorganización y daño de la lamela, acumulación de fitoferritina, invaginación citoplásmica y acumulación de granos de almidón (Goodman *et al.*, 1986; Matthews, 1991).

Cuadro 2. Acumulación de N, P y K por órgano y total en plantas de chile jalapeño sanas e inoculadas con el TEV. (Promedio de 27 dosis para plantas sanas o inoculadas con tres repeticiones que equivalen a 81 datos.)-

Organo	Acumulación de N		Acumulación de P		Acumulación de K	
	Sanas	Inoculadas	Sanas	Inoculadas	Sanas	Inoculadas
	----- mg (g planta) ⁻¹ -----					
Hojas	7.3 a	7.6 b	0.5 a	0.6 a	10.4 a	10.5 b
Tallos	1.4 b	4.8 a	0.1 b	0.4 a	2.3 b	10.3 a
Raíces	2.0 a	2.0 b	0.2 a	0.2 a	3.3 a	3.8 a
Frutos	4.8 a	5.3 b	0.7 a	0.8 b	6.6 a	6.8 b
Total	15.5 a	19.7 a	1.5 b	2.0 a	22.6 b	31.4 a
g planta ^{-1†}	62.07	50.18	59.21	50.44	59.27	50.05

† Biomasa seca total (hojas, tallos, raíces y frutos). Valores con la misma letra en columna son estadísticamente iguales (Duncan $\alpha = 0.05$) dentro de cada órgano y elemento nutrimental.

Las plantas de chile, inoculadas con el TEV, mostraron diferente contenido y distribución nutrimental, con respecto a las plantas sanas, particularmente en el tallo. Velasco *et al.* (1998) obtuvieron resultados similares en plantas de chile de agua infectadas por geminivirus, pero éstos difieren de lo reportado por Kaplan y Bergman (1985), quienes señalaron que las infecciones virales no alteran la distribución de los nutrimentos en las plantas hospedantes.

En las hojas, raíces y frutos de las plantas inoculadas con TEV, se encontró menor contenido de N, P y K que en las plantas sanas (a excepción de P en las raíces que mostraron similar contenido en ambos tipos de plantas), lo contrario ocurrió en los tallos (Cuadro 2). Campillo *et al.* (1981), en hojas de papa de plantas infectadas con el virus del enrollamiento de la hoja (PLRV), también encontraron menor contenido de N, P y K, que en las hojas de las plantas sanas; Velasco *et al.* (1998) encontraron mayor contenido de N y menor de P y K en hojas de plantas de chile de agua infectadas por geminivirus, que en las hojas sanas. En cambio, las hojas de plantas de tomate, infectadas con el TEV, presentaron menor contenido de N y mayor contenido de P y K que las hojas sanas (González, 1996). Al respecto, se ha determinado que el contenido de nutrimentos en las hojas de las plantas varía dependiendo del tipo de virus y la especie hospedante (Kaplan y Bergman, 1985).

La mayor acumulación total de los nutrimentos N, P y K en las plantas inoculadas se debe, en parte, a la menor cantidad de biomasa seca total que se obtuvo en las plantas inoculadas, como lo demuestran otros estudios en plantas de calabacita infectada con el virus de la mancha anular del tabaco (Thomas y McLean, 1967), y en plantas de chile de agua con geminivirus (Velasco *et al.*, 1998). Por otra parte, los tallos de las plantas inoculadas con el TEV mostraron significativamente (Duncan $\alpha = 0.05$) mayor contenido de N, P y K que las plantas sanas; Velasco *et al.* (1998) reportaron resultados similares. Tal vez, el virus influyó en la translocación del N, P y K del tallo hacia las hojas y frutos (Kaplan y Bergman, 1985; Hayasaka *et al.*, 1989; Pennazio y Roggero, 1993; Velasco *et al.*, 1998), al ocasionar un desarreglo del sistema vascular (xilema y floema) (Tschén *et al.*, 1983).

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos indican que las plantas inoculadas, que reciben un adecuado suministro nutrimental, muestran una producción significativa aun cuando la expresión de síntomas y la concentración del TEV también sean favorecidas, a diferencia de cuando las plantas reciben un suministro deficiente o en exceso de algún nutrimento. Este comportamiento señala que la planta nutrida está tolerando al patógeno. Por otro lado, el TEV se asoció con una alteración en el contenido y distribución de los nutrimentos N, P y K en las plantas.

Las dosis con las que se obtuvo mayor contenido de clorofila, frutos frescos y materia seca total en las plantas inoculadas fueron: 18.0, 1.5 y 3.5 me L⁻¹ de N, P y K, respectivamente.

LITERATURA CITADA

- Alcántar G., G. y M. Sandoval V. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación Especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, México.
- Black, L.L., S.K. Green, G.L. Hartman y J.M. Poulos. 1993. Enfermedades del chile: una guía de campo. Asian Vegetable Research and Development Center. Trad. al español por B. Villalon, J.M. Amador y M. Campos. Publicación No. 93-401.
- Brearen, L.M. y C.S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-total. pp. 595-634. *In:* A.L. Page, R.H. Miller y D.R. Keeney (eds.). Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties (Agronomy 9). 2nd ed. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Brunt, A., K. Crabtree y A. Gibbs. 1990. Viruses of tropical plants. CAB-International and ACIAR. Great Britain.
- Campillo R., R., C. Quezada L. y A. Aguila C. 1981. Incidencia del virus del enrollamiento de la hoja de la papa en la respuesta a la fertilización NPK. *Agric. Téc.* 4: 25-29.
- Clark, M.F. y A.N. Adams. 1976. Laboratory notes on the ELISA technique for plant viruses. E. Malling Res. Stn. Maidstone, Kent, England.
- Clark, M.F. y A.N. Adams. 1977. Characteristics of the microplate method of enzyme-linked immunosorbent assay for the detection of plant viruses. *J. Gen. Virol.* 34: 475-483.
- Conn, E.E. y P.K. Stumpf. 1982. Bioquímica fundamental. 3a ed. Trad. al español por J.G. Velasco y E. Cabrera J. Limusa, México.
- Estañol B., E., M. Cadena H. y R. Rodríguez M. 1995. Purificación del virus mosaico común del frijol y otros potyvirus, p. 227. *In:* Avances en la investigación. Instituto de Fitosanidad. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México.

- Gaborjanyi, R., H.N. Doung y R. Vasdinyei. 1992. Relationship between N supplies and virus susceptibility in maize. *Novenytermeles* (Hungary) 41: 315-321.
- González R., M. 1996. Efecto de niveles nutrimentales en las infecciones de los Virus Marchites Manchada del Tomate y Jaspeado del Tabaco en tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.). Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Goodman, R.N., Z. Király y K.R. Wood. 1986. The biochemistry and physiology of plant disease. University of Missouri Press, Columbia.
- Graham, R.D. 1983. Effects of nutrient stress on susceptibility of plants disease with particular reference to the trace elements. *Adv. Bot. Res.* 10: 221-276.
- Green, S.K. y J.S. Kim. 1991. Characteristics and control of viruses infecting peppers: a literature review. Technical Bulletin 18. Asian Vegetable Research and Development Center. Taipei.
- Hayasaka, M., H. Uchino, E. Imura y K. Kanzawa. 1989. Content of sugar and mineral nutrient of sugar beets (*Beta vulgaris*), classified by type of rhizomania symptoms. *Proc. Sugar Beet Res. Assoc. (Japan)* 30: 92-99.
- Hernández H., J., G. Arcos C., R. Rodríguez M. e I. Torres P. 1992. Manual para producir chile jalapeño en los Distritos de Desarrollo Rural de Tuxpan y Martínez de la Torre, Veracruz. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias. Papantla, Veracruz, México.
- Hewitt, E.J. 1966. Sand and water culture methods. CAB Technical Communication 22. Londres.
- Hong, R.B. y M.T. Shi. 1991. Influence of sugarcane mosaic virus (SCMV) on physiological metabolism in sugarcane plants. *Fujian Agric. Sci. Tech.* 4: 14-16.
- Huber, D.M. 1980. The role of mineral nutrition in defense. pp. 386-406. *In:* J.G. Horsfall y E.B. Cowling (eds.). Plant disease and advanced treatise. Vol. 5. Academic Press. New York.
- Huber, D.M. 1981. The use of fertilizers and organic amendments in the control of plant disease. pp. 357-394. *In:* D. Pimentel (ed.). CRC Handbook of pest management in agriculture. Vol. 1, CRC Press. Boca Raton, Fl.
- Kaplan, C.R. y E.L. Bergman. 1985. Virus infection and nutrient elemental content of the host plant: a review. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 16: 439-465.
- Kotuc, J. y G. Vanek. 1992. Effect of unbalanced plant nutrition on harmfulness of grapevine leafroll virus. *Polnohospodarstvo (CSFR)*. 38: 402-409.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. Academic Press. London.
- Martínez G., A. 1988. Diseños experimentales. Métodos y elementos de teoría. Trillas. Méx.
- Matthews, R.E.F. 1991. Plant virology. 3rd ed. Academic Press. San Diego, CA.
- Pennazio, S. y P. Roggero. 1993. The hypersensitive reaction of soybean cultivars to tobacco necrosis virus does not induce systemic resistance but inhibits plant growth. *J. Plant Phytopathol. (Germany)* 138: 118-124.
- Pinto C., B. 1992. Virología agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Méx.
- Steiner, A.A. 1968. Soilless culture. pp. 324-341. *In:* Proceedings of the 6th Colloquium International Potash Institute. Florence, Italy. Intern. Potash Inst. Berne, Switzerland.
- Thomas, J.R. y D.M. McLean. 1967. Growth and mineral composition of squash (*Cucurbita pepo* L.) as affected by N, P, K, and tobacco ring spot virus. *Agron. J.* 59: 67-69.
- Tschen, J.S., S.Y. Liao y C.T. Hsieh. 1983. Stunted growth and stunt disease of Pangola grass in relation to nutrient requirement. *J. Agric. Ass. China (Taiwan)* 125: 72-83.
- Van Loon, L.C. 1987. Disease induction by plant viruses. *Adv. Virus Res.* 33: 205-255.
- Velasco V., V.A., A. Trinidad S., J.L. Tirado T., D. Téliz O., A. Martínez G. y M. Cadena H. 1998. Efecto de algunos nutrimentos en plantas de chile de agua infectadas con virus. *Terra* 16: 317-324.

CONCENTRACION NUTRIMENTAL EN HOJAS E INFLORESCENCIAS DE TRES CULTIVARES DE AGUACATERO

Nutrient Concentration in Leaves and Inflorescences of Three Avocado Cultivars

M. Figueroa-Ruiz¹, A.M. Castillo-González^{1,2}, E. Avitia-García¹ y J.L. Tirado-Torres³

RESUMEN

Con la finalidad de determinar las diferencias en el contenido de N, P, K, Ca, Mg, B y Zn en hojas e inflorescencias de aguacatero (*Persea americana* Mill.) 'Colin V-33', 'Fuerte' y 'Hass', y conocer la distribución de dichos nutrimentos en las inflorescencias de los tres cultivares, se realizó el presente trabajo en Coatepec Harinas, México. La concentración foliar de los nutrimentos en los tres cultivares fue similar, con excepción del B cuya concentración en 'Fuerte' (50.25 mg kg⁻¹) fue superior a la de los otros dos cultivares. La comparación nutrimental de las inflorescencias de los tres cultivares mostró diferencia sólo en el contenido de Mg, las inflorescencias de 'Colin V-33' presentaron la mayor concentración (0.27%). Las inflorescencias de los tres cultivares presentaron mayor concentración de P y K y menor de Ca y Mg que la de las hojas. La distribución de todos los nutrimentos en la panícula (sin considerar al brote) fue homogénea. La concentración nutrimental en el brote varió entre cultivares.

Palabras clave: *Persea americana* Mill. 'Hass', 'Fuerte', 'Colin V-33', brote, parte apical y parte basal de la inflorescencia.

SUMMARY

In Coatepec Harinas, Mexico, N, P, K, Ca, Mg, B, and Zn contents were quantified in leaves and indeterminate inflorescences of 'Colin V-33', 'Fuerte' and 'Hass' avocados (*Persea americana* Mill.) to determine whether nutrient concentrations differ among inflorescences, shoots and leaves of the three

cultivars and how the nutrients are distributed in the inflorescences. Nutrient leaf concentration in the three cultivars were the same, except for the concentration of B, which was higher in 'Fuerte' leaves (50.25 mg kg⁻¹). The inflorescences of the three cultivars showed differences only in Mg concentration; 'Colin V-33' had the highest Mg concentration (0.27%). The inflorescences of the three cultivars had higher P and K but lower Ca and Mg concentrations than leaves. Nutrient distribution in inflorescences was homogeneous. Nutrient concentration in shoots varied among the three cultivars.

Index words: *Persea americana* Mill., 'Hass', 'Fuerte', 'Colin V-33', shoots, apical and basal parts of inflorescence.

INTRODUCCION

México es el principal país productor de aguacate en el mundo, ya que aporta 54% del total de la producción, con el mayor número de hectáreas (90 000) cultivadas en el estado de Michoacán, en donde el cultivar predominante es 'Hass' (Sánchez *et al.*, 1997).

Los cultivares de aguacatero se caracterizan por la gran cantidad de inflorescencias que producen (cada una con más de 100 flores) (Sedgley y Alexander, 1983) y su bajo porcentaje de amarre de fruto (0.02 a 0.1). Se estima que un árbol puede llegar a producir cerca de un millón de flores; sin embargo, sólo uno o dos frutos por inflorescencia pueden alcanzar la madurez (Bergh, 1967, 1986).

Una de las probables causas del reducido amarre de fruto en el aguacatero puede ser la competencia entre el crecimiento vegetativo y el reproductivo, ya que el primero se desarrolla en el momento en que las flores están en el periodo crítico de retención del fruto (Blumenfeld *et al.*, 1983; Whiley, 1990; Bower y Cutting, 1992). La competencia vegetativa:reproductiva a principios de la primavera limita el potencial de producción del aguacatero,

¹ Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, Edo. de México.

² (anasofiacasg@hotmail.com)

³ Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Edo. de México. (jltirado@colpos.colpos.mx)

Recibido: Junio de 2000. Aceptado: Mayo de 2001.

Publicado en Terra 19: 127-132.

especialmente en cultivares vigorosos como 'Fuerte' (Embleton *et al.*, 1959; Blumenfeld *et al.*, 1983).

En aguacatero, las panículas son axilares con respecto a las hojas fotosintéticas en un brote que continúa creciendo y el vigor del árbol puede fomentar el crecimiento temprano del brote indeterminado, el cual compite fuertemente con la débil demanda del frutito en la panícula. Se cree que la competición no involucra al nitrógeno, pero puede involucrar a otros minerales, carbohidratos y agua (Wolstenholme, 1990).

La mayoría de las inflorescencias que produce el aguacatero son indeterminadas, las que terminan con una yema vegetativa que raramente forma una nueva inflorescencia; estas inflorescencias contribuyen con 72.7% del rendimiento de aguacatero 'Hass' (Salazar-García y Lovatt, 1998).

Poco se conoce acerca del contenido y distribución nutrimental en dichas inflorescencias y del papel que juegan los nutrimentos en el proceso de amarre de fruto, a pesar de que, en los frutales, el número de frutos y semillas por planta puede ser directamente afectado por el suplemento de nutrimentos, sobre todo durante los periodos críticos de inducción floral, polinización y amarre de fruto (Marschner, 1995). Se considera que cada uno de los elementos minerales puede ser un factor que limite la producción de semillas, frutos y tubérculos. Tal limitación existe debido a diversos factores, como: la disponibilidad del elemento en el suelo, su concentración y cantidad en la planta, la demanda específica del órgano en crecimiento por el elemento mineral y la tasa de crecimiento de la demanda. En plantas como la mostaza, se ha mostrado que la limitación de la fuente puede ser impuesta por el N más que por carbohidratos (Marschner, 1995).

La investigación realizada en aguacatero, acerca de la caída de frutos en desarrollo, se ha enfocado a la competición por carbohidratos entre los frutos y el crecimiento vegetativo en el periodo de amarre de fruto y poco se conoce acerca del papel de los nutrimentos sobre este proceso.

Con la finalidad de generar conocimiento sobre la floración del aguacatero, se planteó el presente trabajo con los objetivos de determinar si existen diferencias en el contenido de nutrimentos en hojas e inflorescencias indeterminadas de aguacatero 'Colín V-33', 'Fuerte' y 'Hass' y conocer la distribución de los nutrimentos en las inflorescencias de los tres cultivares.

MATERIALES Y METODOS

La presente investigación se llevó a cabo en las parcelas Terrazas 1 y 2, Chirimoyo y Bodega 3 del predio La Cruz, pertenecientes a la Fundación Salvador Sánchez Colín-CICTAMEX, ubicada a 1 km al suroeste de la cabecera municipal de Coatepec Harinas, en el estado de México. Geográficamente, se ubica en los 18°46'38" de latitud norte y 99°46'38" de longitud oeste, a una altitud de 2140 m. El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano, con una temperatura media anual de 16.1°C y una precipitación media anual de 1113.9 mm (Castañeda, 2000).

Se utilizaron cuatro árboles de aguacatero 'Colín V-33' de 23 años, cuatro de 'Fuerte' de 30 años y cuatro de 'Hass' de cinco años. Todos los cultivares productivos e injertados sobre portainjertos de la raza mexicana.

Durante la investigación se hicieron dos fertilizaciones al suelo; una en octubre, con urea (58.42 kg ha⁻¹), carbonato de calcio (160 kg Ca ha⁻¹) y fertilizante comercial (18-46-0 NPK, 260 kg ha⁻¹), y la otra en noviembre, con urea (20 kg ha⁻¹), carbonato de calcio (48 kg Ca ha⁻¹) y una formulación comercial (18-46-0 NPK, 40 kg ha⁻¹).

Las muestras de hojas e inflorescencias indeterminadas de los tres cultivares se tomaron en enero y febrero de 1997. Cada muestra estuvo constituida por 20 hojas maduras y sanas, y por 20 inflorescencias que se dividieron en parte basal, apical y brote. Los muestreos se realizaron en la parte media del árbol.

Para la determinación de N se usó 0.1 g de muestra seca que se sometió a digestión húmeda con una mezcla de ácidos sulfúrico y salicílico. La concentración se determinó por el método de microkjeldahl. Para la determinación de P, K, Ca, Mg y Zn se utilizaron 0.5 g de muestra vegetal seca que se sometió a digestión húmeda con ácidos nítrico, perclórico y sulfúrico. El contenido de P se determinó por el método del molibdovanadato amarillo, la absorbencia se registró a 470 nm en un espectrofotómetro Spectronic 20 de Bauch & Lomb. El contenido de K se determinó por flamometría con un fotómetro de llama Corning 400. Las concentraciones de Ca, Mg y Zn se determinaron por espectrofotometría de absorción atómica, registrando la absorbencia en un espectrofotómetro Pye Unicam SP9 de Phillips a 422.7, 285.2 y 213.9 nm, respectivamente. La metodología utilizada para todos

los análisis fue la descrita por Chapman y Pratt (1973).

Para el caso de B, se usaron 0.25 g de muestra seca que se sometieron a digestión seca en mufla a 550 °C hasta obtener cenizas color blanco-grisáceo y la determinación se hizo por el método de curcumina (Dible *et al.*, 1954), la absorbencia se registró a 540 nm, en un espectrofotómetro Spectronic 20.

En todos los casos, las concentraciones (porcentaje o mg kg⁻¹) se calcularon con base en el peso de materia seca.

Para el análisis de los resultados se utilizó el paquete SAS (Statistical Analysis System, versión 6.4). Se realizó análisis de varianza y prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha = 0.05$) con base en un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones.

RESULTADOS Y DISCUSION

Las concentraciones nutrimentales en las hojas permitieron determinar el estado nutrimental de los árboles en ese momento fenológico (floración y brotación vegetativa).

El contenido de N en hojas no mostró diferencias estadísticas entre cultivares (Cuadro 1); sin embargo, de acuerdo con los valores propuestos por Jones *et al.* (1991) para aguacatero, la concentración de este elemento en 'Colín V-33' se ubicó en el intervalo de insuficiencia.

El contenido de P, K, Ca, Mg y Zn en hojas tampoco mostró diferencias estadísticas entre cultivares (Cuadro 1), los valores se ubicaron dentro de los intervalos de suficiencia (Jones *et al.*, 1991). Se ha observado que valores altos de N en las hojas favorecen la retención de flores y frutos (Williams, 1965), aunque también pueden favorecer el crecimiento vegetativo en varias especies frutales, incluyendo al aguacatero (Loupassaki, 1995). En el caso del K, Jaime *et al.* (1985) encontraron que porcentajes foliares de este elemento menores que 0.4 afectan al crecimiento vegetativo y a la producción;

este porcentaje fue superado por los registrados en las hojas de los tres cultivares estudiados en el presente trabajo. También se considera que para una buena producción, las concentraciones foliares de Zn en aguacatero deben oscilar entre 50 y 75 mg kg⁻¹ (Barroso *et al.*, 1985); lo que sólo se encontró en las hojas de 'Hass'. En el caso del B, la concentración foliar en 'Fuerte' se registró como suficiente, mientras que en 'Colín V-33' y 'Hass' fue insuficiente (Jones *et al.*, 1991) (Cuadro 1).

Los requerimientos nutrimentales de los árboles frutales, y en particular del aguacatero, varían durante el desarrollo y dependen de la edad del árbol, estado fenológico y cultivar (Sánchez y Ramírez, 2000). Gutiérrez (1986) mencionó que la tendencia general de las concentraciones foliares en esta especie está sujeta a la competición de la brotación de otoño con la floración; por lo que los nutrimentos, en lugar de acumularse en las hojas, se utilizan en el proceso de floración y amarre de fruto; esto podría estar sucediendo con el N en el cultivar 'Colín V-33' y con el B en 'Colín V-33' y 'Hass', cuyas concentraciones foliares fueron de insuficiencia. Se ha sugerido que durante la floración y desarrollo vegetativo en aguacatero, dado que se presentan simultáneamente en el árbol, se requieren altas cantidades de N, lo que explica las bajas concentraciones en las hojas que se observan durante estas etapas fenológicas (Embleton *et al.*, 1959). Asimismo, se ha observado que la concentración foliar de B disminuye durante la floración (Castillo, 1996).

Las inflorescencias indeterminadas de los tres cultivares, sin considerar al brote, presentaron concentraciones similares de la mayoría de los elementos (Cuadro 2); con excepción del Mg, el cual presentó mayor concentración en las inflorescencias de 'Colín V-33'. En el caso del Zn, aun cuando no se manifestaron diferencias estadísticas, se observaron diferencias numéricas; las inflorescencias de 'Colín V-33' presentaron cerca de 50% más Zn que las de 'Fuerte' y 'Hass'. Existe poca información del papel del Mg y del Zn en el amarre de frutos; se ha

Cuadro 1. Contenido nutrimental en hojas de tres cultivares de aguacatero.

Cultivar	N	P	K	Ca	Mg	B	Zn
	%			mg kg ⁻¹			
Colín V-33	1.45 a [†]	0.12 a	1.26 a	1.61 a	0.49 a	34.41 b	39.41 a
Fuerte	1.70 a	0.19 a	0.98 a	1.88 a	0.46 a	50.25 a	44.07 a
Hass	2.10 a	0.14 a	1.12 a	1.68 a	0.43 a	35.04 b	51.42 a
DMS	0.66	0.13	0.38	0.47	0.15	11.12	18.50

[†] Valores con la misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales de acuerdo con la prueba de medias de Tukey ($P \leq 0.05$).

Cuadro 2. Contenido nutrimental en inflorescencias indeterminadas de tres cultivares de aguacatero.

Cultivar	N	P	K	Ca	Mg	B	Zn
	----- % -----			----- mg kg ⁻¹ -----			
Colin V-33	1.73 a [†]	0.34 a	2.10 a	0.75 a	0.27 a	32.1 a	92.42 a
Fuerte	2.03 a	0.29 a	2.22 a	0.78 a	0.21 b	36.1 a	42.66 a
Hass	2.06 a	0.30 a	1.87 a	0.83 a	0.22 b	35.2 a	55.22 a
DMS	1.22	0.06	0.37	0.19	0.04	18.18	54.94

[†] Valores con la misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales de acuerdo con la prueba de medias de Tukey ($P \leq 0.05$).

observado que el Zn puede estar relacionado con el número de semillas y frutos por planta en diversas especies (Marschner, 1995), pero es necesaria más investigación. Para otros elementos hay conocimiento acerca del papel que juegan en el proceso de amarre de frutos. Se ha observado que el N prolonga el período de receptividad del estigma en manzano (Williams, 1965); en peral y vid prolonga la viabilidad de los óvulos (Ewart y Kliewer, 1977). El B es uno de los elementos minerales que más se ha estudiado en relación con el proceso de amarre de frutos, su deficiencia en el árbol puede conducir a la caída de flores (Faust, 1989); el B es esencial para la germinación del polen y para el crecimiento del tubo polínico a través del estigma, estilo y ovario (Lovatt, 1993); también incrementa la división celular y síntesis de ácidos nucleicos en el fruto en desarrollo, lo cual aumenta su posibilidad de retención en el árbol (Faust, 1989). En experimentos con flores de aguacatero colocadas en agar, se encontró que el mejor crecimiento del tubo polínico (alcanzando el ovario) se obtuvo con concentraciones de B en las flores de 50 y 100 mg kg⁻¹ (Robbertse *et al.*, 1990), concentraciones que no se presentaron en las inflorescencias de los cultivares 'Colín V-33' y 'Hass', debido a la concentración foliar baja de este elemento (Cuadros 1 y 2).

En cuanto a la distribución de los elementos minerales a lo largo de la inflorescencia, considerando al brote, en el Cuadro 3 se observa que en las inflorescencias de 'Colín V-33', el brote presentó la mayor concentración de P. En las partes apical y basal

la concentración nutrimental fue la misma, lo que indica una distribución homogénea a lo largo de la panícula, por lo tanto, desde el punto de vista nutrimental, todas las flores tienen el mismo potencial de amarre de fruto. Por otra parte, elementos como el P, K, y Zn se encontraron en mayor concentración en las inflorescencias que en las hojas, en tanto que el Ca y el Mg presentaron menor concentración en las inflorescencias; esta concentración fue la mitad de lo registrado en las hojas. El N y el B no variaron entre las hojas e inflorescencias.

El brote de las inflorescencias de 'Fuerte' presentó mayor concentración de P, Ca y Mg. Las partes apical y basal no presentaron diferencias en las concentraciones nutrimentales. Las inflorescencias presentaron mayor concentración de P y K que las hojas; pero presentaron menor concentración de Ca, Mg y B. Las concentraciones de N y Zn en las hojas e inflorescencias fueron similares (Cuadro 4).

El brote de las inflorescencias de 'Hass' presentó mayor concentración de Ca que las partes apical y basal. Igual que en los otros dos cultivares, la distribución de todos los nutrientes fue homogénea a lo largo de la panícula, ya que las concentraciones de las partes apical y basal fueron similares. La concentración de P y K en las inflorescencias fue superior a la de las hojas. La concentración de Ca y Mg fue menor en las inflorescencias, mientras que la de N, B y Zn fue similar a la de las hojas (Cuadro 5).

Las diferencias nutrimentales entre hojas e inflorescencias (constituidas por su parte apical, basal y brote) de los tres cultivares, sugieren que algunos

Cuadro 3. Contenido nutrimental en inflorescencias indeterminadas y hojas de aguacatero 'Colín V-33'.

Órgano	N	P	K	Ca	Mg	B	Zn
	----- % -----			----- mg kg ⁻¹ -----			
Hoja	1.45 a [†]	0.12 c	1.26 b	1.61 a	0.49 a	34.41 a	36.91 b
Inflor. apical	1.77 a	0.34 b	2.04 a	0.73 b	0.26 b	26.81 a	86.96 a
Inflor. basal	1.71 a	0.35 ab	2.17 a	0.75 b	0.29 b	37.37 a	97.88 a
Brote	2.08 a	0.41 a	2.03 a	0.75 b	0.23 b	27.02 a	60.74 ab
DMS	0.78	0.06	0.47	0.51	0.08	18.62	45.68

[†] Valores con la misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales de acuerdo con la prueba de medias de Tukey ($P = 0.05$).

Cuadro 4. Contenido nutrimental en inflorescencias indeterminadas y hojas de aguacatero 'Fuerte'.

Órgano	N	P	K	Ca	Mg	B	Zn
	%			mg kg ⁻¹			
Hoja	1.70 a [†]	0.19 b	0.98 b	1.88 a	0.46 a	50.25 a	44.07 a
Inflor. apical	1.94 a	0.28 ab	2.24 a	0.76 c	0.22 c	32.72 b	42.23 a
Inflor. basal	2.13 a	0.30 ab	2.21 a	0.80 bc	0.21 c	39.48 b	42.60 a
Brote	2.27 a	0.37 a	2.15 a	0.99 b	0.33 b	33.99 b	48.84 a
DMS	0.88	0.12	0.42	0.19	0.10	10.68	20.26

[†] Valores con la misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales de acuerdo con la prueba de medias de Tukey (P = 0.05).

Cuadro 5. Contenido nutrimental en inflorescencias indeterminadas y hojas de aguacatero 'Hass'.

Órgano	N	P	K	Ca	Mg	B	Zn
	%			mg kg ⁻¹			
Hoja	2.10 a [†]	0.14 b	1.12 b	1.68 a	0.43 a	35.04 a	51.42 a
Inflor. apical	2.64 a	0.31 a	1.83 a	0.77 c	0.22 b	38.21 a	56.20 a
Inflor. basal	2.57 a	0.30 a	1.92 a	0.89 bc	0.23 b	32.30 a	54.24 a
Brote	2.29 a	0.35 a	1.95 a	1.11 b	0.27 b	33.14 a	51.30 a
DMS	1.59	0.05	0.38	0.32	0.10	15.39	21.95

[†] Valores con la misma letra dentro de columnas son estadísticamente iguales de acuerdo con la prueba de medias de Tukey (P = 0.05).

elementos como N, P, K y Zn presentaron mayor movilidad en la planta, ya que se translocaron de las hojas a los puntos demandantes (inflorescencias). El N, P y K, son elementos considerados como móviles en el floema de la planta, en tanto que el Zn se considera de mediana movilidad y el Ca de lenta movilidad (Marschner, 1995), por lo que su translocación hacia las inflorescencias fue menor. En el caso del Mg, a pesar de ser móvil en el floema, su concentración baja en las inflorescencias puede obedecer a la fuerza de demanda de estas estructuras por dicho elemento, como lo mencionó Marschner (1995).

El brote es considerado como una estructura con mayor fuerza de demanda que las flores y frutos en desarrollo, lo que afecta la producción (Wolstenholme, 1990). En las inflorescencias de los tres cultivares estudiados, el brote presentó mayor concentración de algunos elementos, dependiendo del cultivar. De tal forma que, en 'Colín V-33', el brote podría competir con las flores por P únicamente; en 'Fuerte' podría hacer lo mismo por Ca y Mg y en 'Hass' por Ca. Los resultados sugieren que la competición entre estructuras vegetativas y reproductivas no involucran al N (Cuadros 3, 4 y 5) como lo mencionó Wostenholme (1990). El cv. 'Hass' se caracteriza por presentar un mayor porcentaje de amarre de fruto que los otros dos cultivares (Gustafson y Rock, 1976), posiblemente debido a la diferencia en el vigor de los árboles; los cultivares vigorosos como 'Fuerte' pueden presentar competición entre el crecimiento vegetativo y el

reproductivo, lo que afecta la producción (Wolstenholme, 1990).

CONCLUSIONES

La diferencia nutrimental entre los tres cultivares radica en la concentración foliar de B y en la concentración de Mg en las inflorescencias. Las inflorescencias indeterminadas de los tres cultivares presentan mayor concentración de P y K y menor de Ca y Mg que las hojas. La distribución de los nutrientes evaluados es homogénea a lo largo de la panícula. La atracción de nutrientes por el brote varía entre cultivares y parece no ser un factor importante de competición con las estructuras reproductivas; es necesaria más investigación al respecto.

LITERATURA CITADA

- Barroso, A., A. Díaz y V. García. 1985. Deficiencias of Zn and Mn in avocado orchards in Tenerife. *Fruits* 40: 39-47.
- Bergh, B.O. 1967. Reasons for low yields of avocados. *California Avocado Soc. Yrbk.* 51: 161-172.
- Bergh, B.O. 1986. *Persea americana*. pp. 253-268. In: A.H. Halevy (ed.). *Handbook of flowering*. Vol. V. CRC Press. Boca Raton, FL.
- Blumenfeld, A., S. Gazit y E. Argaman. 1983. Factor involved in avocado productivity. *Volcani Center, Israel. Spec. Publ.* 222: 84-85.
- Bower, J.P. y J.G.M. Cutting. 1992. The effect of selective pruning on yield and fruit quality in 'Hass' avocado. *Acta Hort.* 296: 55-58.

- Castañeda, V.A. 2000. Identificación y eficiencia de insectos polinizadores del aguacatero en los estados de México y Michoacán, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Castillo G., A.M. 1996. Fluctuación anual de carbohidratos y nutrimentos en relación al amarre de fruto en aguacate (*Persea americana* Mill.) cv. Colín V-33. Tesis de Doctorado en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Chapman, H.D. y P.E. Pratt. 1973. Métodos de análisis para suelos, plantas y aguas. Traducción al español de A. Contin. Trillas. México.
- Dible, W.T., E. Truog y K.C. Berger. 1954. Boron determination in soils and plants. Simplified curcumin procedure. Anal. Chem. 26: 416-422.
- Embleton, T.W., W.W. Jones y M.J. Garber. 1959. Leaf analysis as a guide to nitrogen fertilization of avocado. Proc. Am. Soc. Hort. Sci. 74: 378-382.
- Ewart, A. y W.M. Kliewer. 1977. Effects of controlled day and night temperatures and nitrogen on fruit set, ovule fertility, and fruit composition of several wine grape cultivars. Am. J. Enol. Vit. 28: 88-95.
- Faust, M. 1989. Physiology of temperate zone fruit trees. Wiley. New York.
- Gustafson, C.D. y R.C. Rock. 1976. Costs to produce avocados in San Diego country. California Avocado Soc. Yrbk. 60: 22-24.
- Gutiérrez, R.N. 1986. Dinámica nutricional en árboles de aguacate cv. Fuerte tratados contra *Phytophthora cinnamomi* Rands. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Jaime, S., J.M. Farre, J.M. Hermoso y A. Aguilar. 1985. Composición mineral de las hojas de aguacate (*Persea americana* Mill.) en plantaciones comerciales de la provincia de Málaga, España. 1. Macroelementos. An. Edafol. Agrobiol. 9/10: 1465-1475.
- Jones, B.J. Jr., B. Wolf y H.A. Mills. 1991. Plant analysis handbook. Micro-Macro Publishing, Georgia.
- Loupassaki, M.H. 1995. The effect of nitrogen fertiliser on the growth, yield and mineral contents of leaves of the avocado cv. Fuerte. p. 81. In: Program and Book of Abstracts. World Avocado Congress III. Tel-Aviv, Israel.
- Lovatt, C.J. 1993. Physiology of reproduction of citrus and avocado. VI Curso de Actualización Frutícola. Tópicos selectos para el desarrollo de la fruticultura. Fundación Salvador Sánchez Colín-CICTAMEX, S. C. Coatepec Harinas, México.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. Academic Press. San Diego, CA.
- Robbertse, P.J., L.A. Coetzer, J.J. Bezuidenhout, L. Vorster y N.G.N. Swart. 1990. The influence of boron on fruit set in avocado. Acta Hort. 275: 587-594.
- Salazar-García, S. y C.J. Lovatt. 1998. GA₃ application alters flowering phenology of the 'Hass' avocado. J. Am. Soc. Hort. Sci. 123: 791-797.
- Sánchez, C.S., A.G. Zapata y R.E. Campos. 1997. Producción nacional de aguacate y su comercialización. pp. 17-24. In: Memorias de la Fundación Salvador Sánchez Colín-CICTAMEX, S.C. Coatepec Harinas, México.
- Sánchez, G.P. y P. Ramírez M. 2000. Fertilización y nutrición del aguacatero. pp. 103-113. In: D. Téliz (ed.). El aguacate y su manejo integrado. Mundi-Prensa. México.
- Sedgley, M. y D.M. Alexander. 1983. Avocado breeding research in Australia. California Avocado Soc. Yrbk. 67: 129-135.
- Whiley, A.W. 1990. CO₂ assimilation of developing fruiting shoots of cv. Hass avocado (*Persea americana* Mill.). A preliminary report. S. Afr. Avocado Grower's Assoc. Yrbk. 13: 28-30.
- Williams, R.R. 1965. The effect of summer nitrogen applications on the quality of apple blossom. J. Hort. Sci. 40: 31-41.
- Wolstenholme, B.N. 1990. Resource allocation and vegetative-reproductive competition: opportunities for manipulation in evergreen fruit trees. Acta Hort. 275: 451-459.

DESARROLLO Y CALIDAD DEL PORTAINJERTO DE CHICOZAPOTE INOCULADO CON *Glomus mosseae*, ASPERSION DE AG₃ Y FERTILIZACION NPK AL SUELO Y FOLIAR

Development and Rootstock Quality of Chicozapote (*Manilkara zapota* L.) Inoculated with *Glomus mosseae*, AG₃ Spray, and NPK Fertilization on Soil and Foliar

F.A. Parada B.¹, D. Jaén C.¹, A.E. Becerril R.^{1†} y E. García P.²

RESUMEN

Se realizó un experimento en vivero para evaluar el efecto de la inoculación de *Glomus mosseae*, aspersión de AG₃ y fertilización NPK al suelo y foliar en el desarrollo y calidad de portainjertos de chicozapote (*Manilkara zapota* L.). Se observó un mejor crecimiento de los portainjertos, expresado en una mayor altura, diámetro de tallo y número de hojas, cuando en las combinaciones de tratamientos se incluyeron a *G. mosseae* y AG₃. La fertilización NPK al suelo y foliar ocasionó un efecto depresivo en el desarrollo y calidad de los portainjertos. La altura presentó alta correlación con el diámetro de tallo ($r = 0.85$). Esta última variable correlacionó con el número de hojas ($r = 0.93$). El área foliar y el peso seco total se incrementaron por la fertilización foliar y *Glomus mosseae*. Los cuatro factores ensayados no tuvieron efecto alguno en el peso específico de la hoja. Sin embargo, cuando interaccionó *G. mosseae* con el AG₃ y la fertilización foliar, se obtuvieron diferencias significativas en estas variables. La presencia de la micorriza nativa al final del experimento incrementó el porcentaje de colonización micorrizica y el número de esporas de 55 a 66% y de 289 a 389, respectivamente, en el tratamiento inoculado con *Glomus mosseae*. Por el contrario, cuando la fertilización al suelo interaccionó con los otros factores de variación, el número de esporas se disminuyó significativamente hasta por más de 300.

Palabras clave: Vivero, hongos endomicorrízicos.

SUMMARY

A nursery experiment was carried out to investigate the effect of inoculation of *Glomus mosseae*, AG₃ spray, and NPK soil and foliar fertilization on the development and quality of chicozapote (*Manilkara zapota* L.) rootstock. Results showed better growth of the rootstock, as far as greater height, stem diameter and number of leaves are concerned when *Glomus mosseae* and AG₃ were included in the treatments. The NPK soil and foliar fertilization caused a suppression in the rootstock development and quality. The height was highly correlated with stem diameter ($r = 0.85$). This last variable was highly correlated with number of leaves ($r = 0.93$). Leaf area and dry weight of leaves were increased by the foliar fertilization and *Glomus mosseae* inoculation. The four factors tested had no significant effect on the specific weight of the leaf. However, when *Glomus mosseae* interacted with AG₃ and foliar fertilization, significant differences in these variables resulted. The presence of the native mycorrhiza at the end of the experiment, increased the percentage of mycorrhizal colonization and the number of spores from 55 to 66% and from 289 to 389, respectively, in the treatment inoculated with *Glomus mosseae*. In contrast, when fertilization to the soil interacted with the other variation factors, the number of spores decreased significantly with over 300.

Index words: Nursery, endomycorrhizal fungi.

INTRODUCCION

El creciente aumento de la población en México y la firma de los tratados de libre comercio con los Estados Unidos y los países miembros de la Comunidad Europea evidencian la necesidad de incrementar la superficie de árboles de chicozapote (*Manilkara zapota* L.) para aumentar su producción, que alcanza 10 128 t en una superficie de 1963 ha

¹ Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Edo. de México. Tel. y Fax (595) 2-02-33.

[†] (becerril@colpos.colpos.mx)

² Colegio de Postgraduados, Campus Veracruz, 91700 Veracruz, México.

(SARH, 1993). Al respecto, es poco el interés de los productores, debido a que no hay variedades bien definidas, los problemas técnicos en el manejo de huertos en producción y el lento crecimiento de los árboles que son producidos en los viveros comerciales (Saucedo y Arévalo, 1994). Los árboles de vivero tardan tres años para alcanzar el diámetro necesario para ser injertados. Algunas de las causas son: los injertos utilizados no son los adecuados, las condiciones ambientales del sitio son desfavorables, fallas en el manejo de las plantas durante los procesos de preparación de plantas en el vivero, transporte inadecuado de las plantas al sitio de plantación, el trasplante no es el adecuado. Finalmente, la condición fisiológica de la planta es determinante debido a prácticas de cultivo inapropiadas durante la etapa de vivero. También se han observado baja supervivencia y poca adaptación cuando son establecidas en el campo (Jaén y Becerril, 1994). Una causa importante de estos fracasos es la heterogeneidad del estado físico y fisiológico de las plantas, lo que constituye un claro indicador de su baja calidad. Por ello, es importante tener un mejor entendimiento de la fenología de las plantas frutales e implementar y validar tecnologías de vivero para producir plantas de calidad con las características morfológicas y fisiológicas necesarias que les permitan tener un buen desarrollo en campo.

En diversos estudios, se ha demostrado la importancia de la fertilización NPK (Campbell y Malo, 1977) y la aplicación de ácido giberélico (AG_3) para promover el crecimiento vegetativo (Papanna *et al.*, 1995) del chicozapote. Sin embargo, se desconoce la interacción que ocurre entre los hongos endomicorrízicos (*Glomus mosseae*), el AG_3 y la fertilización NPK al suelo y foliar en el desarrollo y calidad del portainjerto de chicozapote (*Manilkara zapota* L.), lo cual fue el objeto del presente estudio.

MATERIALES Y METODOS

La investigación se llevó a cabo de agosto de 1998 a marzo de 1999 en vivero, en las instalaciones del Colegio de Postgraduados (CP), Campus Veracruz, ubicadas en Tepetates, Veracruz, y situadas a $19^{\circ} 10'$ norte y $96^{\circ} 16'$ oeste, a 40 m de altitud, con temperatura promedio anual de $35.4^{\circ}C$ y precipitación total anual de 1200 mm. Se utilizó un factorial 2^4 completo, con diseño experimental completamente al azar, con 16 combinaciones de tratamientos y tres repeticiones; la unidad

experimental fue de cinco plantas (una planta por bolsa). Los factores y sus niveles en estudio fueron: *Glomus mosseae*, 0 y 56 esporas por planta; AG_3 , 0 y 500 mg L^{-1} ; nitrógeno, 0 y 10 kg ha^{-1} ; fósforo, 0 y 5 kg ha^{-1} ; y potasio, 0 y 10 kg ha^{-1} (Campbell y Malo, 1977). Se usó Bayfolan® forte como fertilizante foliar, 0 y 5 mL L^{-1} (Papanna *et al.*, 1995).

El Laboratorio de Nutrición de Frutales, de la Especialidad de Fruticultura (CP) proporcionó la cepa de hongos endomicorrízicos identificada taxonómicamente como *Glomus mosseae*. La producción del inoculante se efectuó mediante el método de plantas hospedantes (Sieverding, 1983), utilizando semillas pregerminadas de jamaica (*Hibiscus sabdariffa* L.) en sustrato estéril. Durante cuatro meses, las plántulas crecieron en invernadero; posteriormente se cosecharon y se verificó la colonización micorrízica en la raíz con la técnica de Phillips y Hayman (1970). Las esporas se extrajeron al pasar una suspensión de 100 g de suelo seco por una serie de tamices graduados (Gerdemann y Nicolson, 1963). La identificación se hizo con base en la descripción de los grupos de paredes de las esporas (Schenck y Pérez, 1990).

Las plántulas de chicozapote se obtuvieron a partir de semilla que se trató con una solución de Benlate al 2% y se puso a germinar en charolas de plástico con arena estéril. Como sustrato de crecimiento se empleó una mezcla de suelo, arena y materia orgánica en proporción 2:1:1, fumigada con bromuro de metilo. En el trasplante, las plántulas se inocularon con 300 esporas de *Glomus mosseae* esterilizadas en la superficie con Cloramina T a 0.02% (Mosse y Phillips, 1971). A 20 días después del trasplante, las plantas se asperjaron con una solución de 5 g de AG_3 por litro de agua (500 mg L^{-1}) (Papanna *et al.*, 1995), posteriormente las aplicaciones fueron semanales. El fertilizante foliar empleado fue Bayfolan® forte a dosis de 5 mL L^{-1} cada 15 días. La fuente de N fue urea (con 46% de N), la de fósforo fue superfosfato de calcio simple (con 20% de P_2O_5) y el cloruro de potasio (con 60% de K_2O) fue la fuente de K.

Cada 30 días, se midieron la altura de la planta, el diámetro del tallo, el número de hojas y el área foliar. El peso específico de la hoja, el peso seco total, el porcentaje de colonización y el número de esporas producidas se cuantificaron después de cosechar las plantas. Estas ocho variables se analizaron mediante el empleo del Sistema de Análisis Estadístico (SAS, 1997), versión 6.12, específicamente análisis de varianza y pruebas de Tukey para comparación de

medias; con el coeficiente de correlación de Pearson, se determinó la correlación entre variables.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los cuatro factores de variación, ensayados individualmente en la presente investigación, influyeron en el crecimiento longitudinal del tallo; sin embargo, únicamente el AG₃ (tratamiento B) estimuló significativamente la altura de las plantas de chicozapote (Cuadro 1). Las plantas testigo superaron la altura de las plantas que se fertilizaron al suelo con NPK (Tratamiento S) y con fertilizante foliar (Tratamiento F). La triple interacción BFG (AG₃ + fertilizante foliar + *G. mosseae*) indujo la mayor altura de las plantas que fue de 54.66 cm, no obstante, fue estadísticamente igual a las siguientes interacciones: BSF, GBS, BG, BS, BF y B (Cuadro 1). El análisis de varianza indicó que el incremento en altura se debió al AG₃ y no al *G. mosseae* ni a la fertilización al suelo o foliar. Probablemente, el efecto del AG₃ en el incremento en la altura de las plantas de chicozapote se determinó por la fenología de las plantas y los mecanismos fisiológicos que se indujeron por los tratamientos para regular o modificar alteraciones en los niveles de las fitohormonas de las plantas. Al respecto, Hirsch *et al.* (1997) indicaron que muchas de las respuestas de crecimiento, observadas en las plantas, pueden regularse, en parte, por alteraciones en los niveles endógenos de las fitohormonas. Por otra parte, Taiz y Zeiger (1991) mencionaron que con días largos se promueve la síntesis de giberelinas, por lo que su solo efecto provoca un incremento en la longitud. Sin embargo, cuando el AG₃ interacciona con las auxinas naturales, su efecto en la planta puede ser contradictorio y depende de la etapa fenológica, concentración y número de aplicaciones que se realicen (Guardiola *et al.*, 1982).

En el diámetro de tallo, se encontró que la interacción BFG, constituida por AG₃ (B), fertilizante foliar (F) y *Glomus mosseae* (G), resultó con el mayor diámetro de tallo que fue de 0.56 mm (Cuadro 1); no obstante, estadísticamente fue igual al testigo (T) con 0.54 mm y a las interacciones BF y BSF con 0.52 mm (Cuadro 1). Estos resultados son interesantes de destacar, debido a la eficiencia del AG₃ para promover un mayor grosor de tallo en las plantas donde interaccionó con los otros factores de variación. Huttly y Phillips (1995) observaron que tallos tratados con giberelinas bioactivas causaron una reorientación en los microtúbulos y microfibrillas de la pared

Cuadro 1. Efecto de *Glomus mosseae* (G), fertilización al suelo (S), fertilización foliar (F) y AG₃ (B) sobre la altura, diámetro de tallo, número de hojas y área foliar de portainjertos de chicozapote.

Tratamiento	Altura cm	Diámetro de tallo mm	Número de hojas	Area foliar cm ²
T [†]	36.26 b [†]	0.54 a	14 b	241.4 c
G	40.06 b	0.46 b	18 a	411.3 a
S	31.13 c	0.44 b	14 b	127.0 d
F	34.46 c	0.48 a	15 a	508.4 a
B	48.53 a	0.51 a	17 a	347.6 b
SG	32.20 c	0.46 b	14 b	361.2 b
SF	35.26 b	0.47 b	15 a	511.4 a
BF	50.13 a	0.53 a	20 a	107.9 d
FG	34.06 c	0.45 b	15 a	352.3 b
BS	48.33 a	0.50 a	18 a	153.2 c
BG	52.80 a	0.50 a	18 a	348.9 b
SFG	32.53 c	0.47 b	15 a	162.1 c
BSF	51.13 a	0.52 a	17 a	352.0 b
BFG	54.66 a	0.56 a	20 a	249.3 c
GBS	47.80 a	0.49 a	17 a	110.8 d
BSFG	43.60 ab	0.50 a	16 a	207.5 c

[†] Sin *G. mosseae*, sin fertilización al suelo, sin fertilización foliar, sin AG₃.

[†] Promedio con la misma letra, en cada variable en las columnas, son iguales (Tukey, 0.05).

celular perpendicular a la dirección del crecimiento, favoreciendo así su elongación; esto se debió a un aumento notable en la mitosis de los meristemas subapicales en plantas con fotoperíodo de días largos (Taiz y Zeiger, 1991).

Con respecto al número de hojas, todos los tratamientos resultaron ser estadísticamente iguales, a excepción de aquellos que produjeron un menor número de hojas: testigo (T), fertilización al suelo (S) y fertilización al suelo más *Glomus mosseae* (SG) (Cuadro 1). Al contrastar estos resultados, con los de las dos variables anteriores (Cuadro 1), se observa que en el número de hojas, la fertilización al suelo tuvo un efecto depresivo; por el contrario, el AG₃, *G. mosseae* y la fertilización foliar indujeron significativamente la emisión de estos importantes órganos fotosintéticos. De acuerdo con Hirsch *et al.* (1997), las alteraciones en los niveles endógenos de las fitohormonas determinan las respuestas de crecimiento en las plantas ensayadas y se puede argumentar que la concentración de AG₃ en la planta de chicozapote se incrementó significativamente debido a la aplicación externa que se realizó con AG₃, e incluso la inoculación de *G. mosseae* pudo contribuir. Experimentalmente se ha comprobado (Allen, 1991; Jaén *et al.*, 1997) que los hongos endomicorrizicos son capaces de sintetizar ácido giberélico, por lo que, cuando el AG₃ y *G. mosseae* interaccionaron,

probablemente hubo un exceso de AG₃ que estimuló el desarrollo vegetativo de las plantas.

En cuanto al área foliar, los resultados mostraron que la fertilización foliar estimuló significativamente el crecimiento de las hojas. Por ejemplo, cuando los factores ensayados actuaron individualmente, se encontró que las hojas de las plantas del tratamiento fertilizadas por vía foliar lograron 508.4 cm² de área foliar mientras que sólo 411.3 cm² del tratamiento inoculado con *G. mosseae* (Cuadro 1). La fertilización al suelo indujo el resultado más bajo, que fue de 127.0 cm². Cuando interaccionó la fertilización al suelo (S) con la foliar (F), se incrementó hasta 511.4 cm² el área foliar de las plantas, por lo cual causaron diferencias altamente significativas, con relación a los demás tratamientos. En las otras combinaciones de tratamientos, se observó una participación discreta del AG₃ en su efecto para esta variable (Cuadro 1). Estos resultados muestran el alto grado de aprovechamiento de los nutrimentos aplicados por la vía foliar, lo cual estimuló un mayor tamaño de hojas. Efectos similares se han encontrado en otras especies de plantas, por ejemplo, en árboles de manzano fertilizados foliarmente con urea y nutrimentos, se cuantificó una mayor concentración de nitrógeno en la hoja y contenido de clorofila, fotosíntesis y tamaño de la hoja, siendo la mejor época para aplicar: plena floración y una semana después de la floración. Además, se obtuvo mayor crecimiento de brotes

cuando se realizaron aplicaciones de urea al 5% en otoño, que con los fertilizantes al suelo en primavera (Yu y Liu, 1995). Por otra parte, Fassbender (1982) mencionó que el superfosfato de calcio triple, al ser aplicado en suelos tropicales, sufre una serie de reacciones mediante las cuales el fósforo hidrosoluble que contiene pasa a formar compuestos de muy baja solubilidad, que limitan, en gran parte, su aprovechamiento por las plantas. Esto permite intuir, que la respuesta de la planta de chicozapote al suministro de fertilizante al suelo se encubrió por la baja solubilidad de los nutrimentos bajo estas condiciones.

El peso específico de la hoja (PEH) se influenció significativamente hasta 8.65 mg g⁻¹, cuando el AG₃ (B), la fertilización foliar (F) y *G. mosseae* (G) interaccionaron en el tratamiento BFG (Cuadro 2). Asimismo, cuando los cuatro factores de variación ensayados actuaron individualmente, se encontraron los siguientes resultados: *G. mosseae* (7.97 mg g⁻¹), AG₃ (7.04 mg g⁻¹), fertilización foliar (7.03 mg g⁻¹) y fertilización al suelo (6.40 mg g⁻¹), por 7.90 mg g⁻¹ de PEH de las plantas testigo (Cuadro 2). Marini y Sowers (1990) indicaron que el PEH está relacionado con la capacidad de producir tejido nuevo por las estructuras fotosintéticas de la planta. De igual forma, el PEH estima la cantidad relativa de tejido fotosintético en peso seco por unidad de área, el cual, según Secor *et al.* (1982), se utiliza como índice para

Cuadro 2. Efecto de *Glomus mosseae* (G), fertilización al suelo (S), fertilización foliar (F) y AG₃ (B) sobre el peso específico de hoja, peso seco total, porcentaje de colonización y número de esporas.

Tratamiento	Peso específico de hoja mg g ⁻¹	Peso seco total g	Colonización		Número de esporas	
			180 DDT	240 DDT	180 DDT	240 DDT
			----- % -----			
T [†]	7.90 a [‡]	2.45 c	0 c	90 a	0 c	141 c
G	7.97 a	4.05 a	55 b	66 b	289 b	389 a
S	6.40 b	1.98 cd	0 c	54 b	0 c	147 c
F	7.03 a	4.15 a	0 c	52 b	0 c	195 b
B	7.04 a	2.13 c	0 c	59 b	0 c	151 c
SG	7.66 a	2.44 c	50 b	54 b	450 a	415 a
SF	7.33 a	3.43 ab	0 c	88 a	0 c	178 b
BF	6.74 b	1.02 d	0 c	76 ab	0 c	161 c
FG	6.91 b	2.54 bc	80 a	95 a	371 b	403 a
BS	6.84 b	1.34 d	0 c	26 c	0 c	179 bc
BG	7.23 a	2.73 b	60 b	63 b	310 b	408 a
SFG	6.24 b	0.96 d	90 a	82 a	504 a	214 b
BSF	6.88 b	5.71 a	0 c	100 a	0 c	101 c
BFG	8.65 a	3.04 b	51 b	66 b	312 b	420 a
GBS	7.17 a	3.00 b	85 a	95 a	507 a	225 b
BSFG	7.48 a	2.29 c	74 ab	85 a	334 b	259 b

[†] Sin *G. mosseae*, sin fertilización al suelo, sin fertilización foliar, sin AG₃.

[‡] Promedio con la misma letra, en cada variable, son iguales (Tukey, 0.05).

DDT = Días después del transplante.

tasa fotosintética. Con base en lo anterior, los resultados encontrados en la presente investigación indican una mayor eficiencia fotosintética en las plantas inoculadas con *G. mosseae*; sin embargo, estadísticamente no fue significativo, en relación con los demás tratamientos. Wang (1996) encontró que en plantas de papaya inoculadas con hongos micorrízicos, la eficiencia fotosintética fue más alta que aquellas no inoculadas, aun cuando se encuentren en periodos de estrés por sequía. No obstante, este efecto también puede estar relacionado con la demanda y/o mayor consumo de agua por las plantas de chicozapote de las interacciones BFG, BG, BSF, BF y B, debido a que lograron una mayor altura (Cuadro 1). Esto pudo haber afectado y disminuido la tasa fotosintética, ya que este factor suele modificar la actividad fotosintética (Flore y Lakso, 1989; Acosta-Avalos *et al.*, 1996).

En el peso seco total, la interacción del AG₃ con la fertilización al suelo y foliar (Tratamiento BSF) indujo la mayor biomasa total, que fue de 5.71 g (Cuadro 2). Cuando estos factores actuaron individualmente, se encontraron los siguientes resultados: 2.13 g con AG₃, 1.98 g con fertilización al suelo y 4.15 g con fertilización foliar. Con base en estos resultados, el análisis de varianza atribuyó los incrementos en el peso seco total del Tratamiento BSF, al efecto de la fertilización foliar y no al AG₃ o a la fertilización al suelo. Por su parte, *Glomus mosseae* estimuló un peso seco total de 4.05 g, pero cuando interactuó con la fertilización foliar (Tratamiento FG) y con la fertilización al suelo (Tratamiento SG), la biomasa seca total disminuyó significativamente hasta 2.54 g y 2.44 g, respectivamente (Cuadro 2). Johnson (1993) encontró que, después de ocho años de fertilización con N, P, K y micronutrientes en suelos con baja disponibilidad de nutrientes, la fertilización redujo el beneficio que las comunidades de hongos micorrízicos arbusculares proporcionaban a las plantas. Al respecto, Thomson *et al.* (1986) indicaron que los hongos micorrízicos difieren en su sensibilidad a los niveles de P en el suelo o en la planta, motivo por el cual la fertilización puede alterar la eficiencia o función de los hongos micorrízicos (Thingstrup *et al.*, 2000).

El porcentaje de colonización micorrízica se evaluó en dos fechas: a los 180 días después del trasplante (DDT) y a los 240 DDT, tiempo en el cual se realizó la injertación de los patrones de chicozapote. La primera fecha correspondió a la finalización de la investigación; sin embargo, se dejó

un lote de plantas de cada uno de los tratamientos para ser injertados a los 300 días. A esta fecha, las raíces de las plantas penetraron el plástico de las bolsas y entraron en contacto con el suelo no esterilizado. Motivo por el cual, a estas otras plantas se les evaluó el porcentaje de colonización y el número de esporas, para evaluar el efecto de la micorriza nativa en ambas variables.

En el Cuadro 2 se observa que el porcentaje de colonización se estimuló significativamente por la fertilización foliar a los 189 DDT. *G. mosseae* produjo 55% de colonización, pero cuando interactuó con la fertilización foliar (Tratamiento FG), el porcentaje de colonización se incrementó hasta 80%. Asimismo, en la triple interacción de este hongo con la fertilización al suelo y la foliar (Tratamiento SFG), la colonización se incrementó hasta 90% (Cuadro 2). El análisis de varianza indicó que el incremento en el porcentaje de colonización en esta triple interacción, se debió al efecto de la fertilización foliar y no de la fertilización al suelo. De hecho, cuando *G. mosseae* interactuó con la fertilización al suelo (Tratamiento SG), el porcentaje de colonización se redujo a 50% (Cuadro 2). Koide y Li (1990) también observaron que la colonización micorrízica se redujo significativamente en plantas teniendo un alto nivel de fósforo. Sin embargo, el nivel de P de la planta es influenciado por el nivel de P del suelo (Liu *et al.*, 2000). El mecanismo por el cual el P regula la colonización micorrízica aún no es bien comprendido, pero de acuerdo con Bruce *et al.* (1994), la baja formación de micorriza a altas dosis de P puede ser el resultado de un reducido crecimiento de la tasa de unidades de infección y una producción limitada de hifas externas secundarias; asimismo, la exudación de la raíz puede ser regulada por la carencia de plasmalema de las células corticales de la raíz, la cual en turno es determinada por los valores de P celular (Guttay, 1983).

A los 240 DDT, se observó un efecto altamente significativo de la micorriza nativa en el porcentaje de colonización, principalmente en los tratamientos que no se inocularon con *G. mosseae* (Cuadro 2). Por ejemplo, la combinación de Tratamientos BSF, resultó con 100% de colonización y las plantas testigo con 90%. En el caso del tratamiento que se inoculó con *G. mosseae*, la colonización micorrízica fue de 66% (Cuadro 2). Resultados similares obtuvieron Boddington y Dodd (2000), quienes evaluaron el efecto de la adición de fosfato, materia orgánica o fertilizante sobre el desarrollo y colonización de

hongos micorrízicos nativos. Sus resultados mostraron que se redujo la colonización micorrízica en *Gigaspora rosea*, pero se incrementó en *Glomus manihotis* cuando ambos se inocularon en plantas de *Desmodium ovalifolium* L.

Finalmente, el número de esporas, a los 180 DDT, se incrementó significativamente por efecto de la fertilización al suelo (Cuadro 2). El número de esporas producidas por *G. mosseae* fue de 289, pero cuando interactuó con la fertilización al suelo (Tratamiento SG), se incrementó a 450 esporas. Esta misma tendencia se mantuvo en todas las combinaciones de tratamientos donde interactuó la fertilización al suelo con *G. mosseae*, caso de la interacción SFG que produjo 504 esporas (Cuadro 2). Pedraza-Santos *et al.* (2000) también contabilizaron un mayor número de esporas micorrízicas, cuando al suelo se le adicionaron 40 mg L⁻¹ de NPK, en relación con la dosis de 20 mg L⁻¹ de NPK.

A los 240 DDT, se contabilizaron esporas de hongos micorrízicos nativos en todos los tratamientos, lo cual incrementó el número en aquellos tratamientos que previamente habían sido inoculados con *G. mosseae* (Cuadro 2). Inversamente en las combinaciones de tratamientos: SFG, BFG, GBS y BSFG, el número de esporas se redujo a pesar de que previamente se inocularon con *G. mosseae* (Cuadro 2). Abbott y Robson (1991) mencionaron que los hongos que agresivamente colonizan raíces y esporulan a mayor número, comúnmente son hongos nativos que ocurren en el campo. Sin embargo, en un reciente estudio de campo se indicó que los hongos micorrízicos arbusculares, provenientes de diferentes géneros, pueden variar en su sensibilidad a las prácticas agrícolas (Boddington y Dodd, 2000).

CONCLUSIONES

La interacción de *Glomus mosseae* con AG₃ favoreció el desarrollo y calidad de los portainjertos de chicozapote. Esta respuesta se potenció por la fertilización foliar, motivo por el cual el tiempo de injertación fue a los 240 días y no a los 300 días, como ocurre en los viveros comerciales.

LITERATURA CITADA

- Abbott, L.K. y A.D. Robson. 1991. Factors influencing the occurrence of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. *Agric. Ecosys. Environ.* 35: 120-150.
- Acosta-Avalos, D., J.J. Alvarado-Gil, H. Vargas, J. Frias-Hernández, V. Olalde-Portugal y L.C.M. Miranda. 1996. Photoacoustic monitoring of the influence of arbuscular mycorrhizal infection on the photosynthesis of corn (*Zea mays* L.). *Plant Sci.* 119: 183-190.
- Allen, M.F. 1991. Synthesis of auxins, gibberellins and cytokinins present in the bacterial cultures on the formation and responses to *Glomus mosseae*. pp. 210-217. *In:* W. Elson y P. Suter (eds.). *Hormone action in the whole life on plants.* Academic Press. New York.
- Boddington, C.L. y J.C. Dodd. 2000. The effect of agricultural practices on the development of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi. I. Field studies in an Indonesian ultisol. *Plant Soil* 218: 137-144.
- Bruce, A., S.E. Smith y M. Tester. 1994. The development of mycorrhizal infection in cucumber: Effects of P supply on root growth, formation of entry points and growth of infection units. *New Phytol.* 127: 507-514.
- Campbell, C. y S. Malo. 1977. El chicozapote, fruta exquisita. La Hacienda (Rep. Del Salvador) 172: 10.
- Fassbender, H.W. 1982. Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina. IICA. San José de Costa Rica.
- Flore, J.A. y A.N. Lakso. 1989. Environmental and physiological regulation of photosynthesis in fruit crops. *Hort. Rev.* 11: 111-157).
- Gerdemann, J.W. y T.H. Nicolson. 1963. Spores of mycorrhizal *Endogone* species extracted from soil by wet sieving and decanting. *Trans. Brit. Mycol. Soc.* 46: 235-244.
- Guardiola, J.L., C. Monerri y M. Agusti. 1982. The inhibitory effects of gibberellic acid on flowering in Citrus. *Physiol. Plant* 55: 135-142.
- Guttay, A.J.R. 1983. The interaction of fertilizers and vesicular-arbuscular mycorrhizae in composted plant residues. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 108: 222-224.
- Hirsch, A.M., Y. Fang, S. Asad y Y. Kapulnik. 1997. The role of phytohormones in plant-microbe symbioses. *Plant Soil* 194: 171-184.
- Huttly, A.K. y A.L. Phillips. 1995. Gibberellin-regulated plant genes. *Minireview. Physiol. Plant* 95: 310-317.
- Jaén C., D. y A.E. Becerril R. 1994. Efecto del sustrato sobre el desarrollo de naranjo agrio inoculado con micorrizas. *Proc. Interamerican Soc. Trop. Hort.* 39: 25-29.
- Jaén C., D., A.E. Becerril R., Ma. T. Colinas L. y J.A. Santizo R. 1997. Crecimiento y producción de fresa inoculada con *Glomus mosseae*, asperjada con AG₃ y fertilizada con NPK. *Agrociencia* 31: 165-169.
- Johnson, N.C. 1993. Can fertilization of soil select less mutualistic mycorrhizae. *Ecol. Applic.* 3: 749-757.
- Koide, R.T. y M. Li. 1990. On host regulation of the vesicular-arbuscular mycorrhizal symbioses. *New Phytol.* 114: 59-64.
- Liu, A., C. Hamel, R.I. Hamilton y D.L. Smith. 2000. Mycorrhiza formation and nutrient uptake of new corn (*Zea mays* L.) hybrids with extreme canopy and leaf architecture as influenced by soil N and P levels. *Plant Soil* 221: 157-166.
- Mosse, B. y J.M. Phillips. 1971. The influence of phosphate and other nutrients on the development of vesicular-arbuscular mycorrhiza in culture. *J. Gen. Microbiol.* 69: 157-166.
- Marini, R.P. y D.L. Sowers. 1990. Net photosynthesis, specific leaf weight and flowering of peach as influenced by shade. *HortSci.* 25: 331-334.
- Papanna, Y., G.S. Sulikeri y N.C. Hulmani. 1995. Effect of growth regulators on seed germination and growth of seedling of sapota (*Manilkara achras*). *Karnataka J. Agric. Sci.* 8: 60-64.

- Pedraza-Santos, M.E., D. Jaén-Contreras, M.A. Gutiérrez-Espinosa, T. Colinas-Leon y C. López-Peralta. 2000. Growth and nutrition of chrysanthemum microplants inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi. *HortSci.* 35: 446.
- Phillips, J.M. y D.S. Hayman. 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Brit. Mycol. Soc.* 55: 158-160.
- SARH. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. 1993. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola de los Estados Unidos Mexicanos. pp. 268 y 643.
- SAS Institute. 1997. SAS/STAT User's Guide. Release 6.03 Edition. Cary, NC. USA.
- Saucedo, V.C. y G.L. Arévalo. 1994. Problemática del manejo postcosecha de frutos de chicozapote. pp. 235-240. *In: Memorias la Reunión Internacional y 2a Reunión Nacional de frutales nativos e introducidos con demanda nacional e internacional.* Montecillo, México. Ed. Universidad Autónoma Chapingo.
- Schenck, N.C. y Y. Pérez. 1990. Manual for the identification of VA mycorrhizal fungi. 3rd ed. Synergistic Publications. Gainesville, Florida, USA.
- Secor, J., D.R. McCarty, R. Shibbes y D.E. Green. 1982. Variability and selection for leaf photosynthesis in advances generations of soybean. *Crop Sci.* 22: 255-258.
- Sieverding, E. 1983. Manual de métodos para la investigación de la micorriza vesículo-arbuscular en el laboratorio. Centro Internacional de Agricultura Tropical. Colombia.
- Taiz, L. y E. Zeiger. 1991. Plant physiology. Benjamin/Cummins, Redwood City, California.
- Thingstrup, I., H. Kahiluoto e I. Jakobsen. 2000. Phosphate transport by hypha of field communities of arbuscular mycorrhizal fungi at two levels of P fertilization. *Plant Soil* 221: 181-187.
- Thomson, B.D., A.D. Robson y L.K. Abbott. 1986. Effects of phosphorus on the formation of mycorrhizas by *Gigaspora calospora* and *Glomus fasciculatum* in relation to root carbohydrates. *New Phytol.* 103: 751-765.
- Wang, Ch-L, 1996. Response of papaya inoculated with mycorrhizal fungi to drought stress. pp. 124. *In: Abstracts of First International Conference on Mycorrhizae.* University of California. Berkeley. USA
- Yu, S.B. y Y.T. Liu. 1995. Study on the effect of foliar fertilization on the dimension, N and chlorophyll contents of apple leaves. *J. Fruit Sci.* CAB Abstracts 12: 171-172.

ASOCIACION LUPINO-MAIZ EN LA NUTRICION FOSFATADA EN UN ANDOSOL

Association Lupinus-Maize in Phosphate Nutrition in an Andosol

Adán Rodas Cifuentes¹, Roberto Núñez Escobar^{2†}, Vicente Espinosa Hernández² y Gabriel Alcántar González²

RESUMEN

La roca fosfórica (RF) como fuente de fósforo para aplicación directa en Andosoles ha demostrado ser una alternativa económicamente viable. Estudios para identificar prácticas que incrementen su eficiencia han comprendido varias acciones como: acidulación parcial con azufre, ácido fosfórico o sulfúrico; mezcla con estiércol en proceso de fermentación; adición de fertilizantes nitrogenados y fosfatados; inoculación con micorrizas y utilización de microorganismos que promuevan un medio ácido. Recientemente se demostró que, en condiciones de limitado suministro de fósforo, algunas plantas como *Lupinus arboreus*, además de autoabastecerse de fósforo, dejan disponible una fracción para otros cultivos que se encuentren en asociación con ellas. Investigaciones con RF de Carolina del Norte demostraron que *L. albus* y *L. angustifolius* pueden disolver cantidades considerables de fósforo, debido probablemente a la excreción de protones en las raíces que provocan descensos de pH en la rizósfera. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de *L. mutabilis* en asociación con *Zea mays* en la eficiencia agronómica de la RF de Baja California. En el experimento de invernadero se empleó un andosol de la Meseta Tarasca de Michoacán, México. Se probaron tres fuentes de fósforo (superfosfato triple, roca fosfórica y mezcla de ambas), tres dosis (150, 300 y 450 kg de P₂O₅ ha⁻¹), dos formas de aplicación (localizada e incorporada), y dos sistemas de producción (monocultivo de maíz y asociación maíz+lupino). Las variables evaluadas en el momento de la cosecha fueron: producción de biomasa, contenido de nitrógeno y fósforo en el tejido vegetal, eficiencia relativa de las fuentes de fósforo. En general, la materia seca, el contenido de fósforo y

el contenido de nitrógeno fueron mayores en el maíz asociado con lupino. *L. mutabilis* mejoró la eficiencia de la RF incorporada homogéneamente en el suelo; sin embargo, esta fue inferior a SFT y SFT+RF.

Palabras clave: *Lupinus mutabilis*, *Zea mays*, fósforo, roca fosfórica, eficiencia agronómica.

SUMMARY

Rock phosphate (RP) as a phosphorus source for direct application in andosols has demonstrated to be an economically viable alternative. Studies for assessment of practices that increase RP efficiency have included several actions, such as partial acidulation with phosphoric acid, sulphuric acid or with sulfur, mixtures with manure during fermentation, addition of nitrogen and/or phosphate fertilizers, inoculation with micorrhizas and use of microorganisms that promote an acid medium. Recently, it was demonstrated that under conditions of limited phosphorus supply, some plants such as *Lupinus arboreus* solubilize phosphorus not only for their own nutrition, but they leave some P available for other crops associated with them. Moreover, evaluations with North Carolina RP demonstrated that *L. albus* and *L. angustifolius* probably dissolved considerable quantities of P due to the excretion of protons in the roots that caused a decrease of the rhizosphere pH. The general objective of the present research was to evaluate the effect of *L. mutabilis* in association with *Zea mays* on the agronomic efficiency of the Baja California RP. The experimental work was carried out in the greenhouse of the 'Colegio de Postgraduados', using an andosol of the Meseta Tarasca of Michoacán, Mexico. The treatment design was based on a factorial combination of three phosphorus sources, three P rates, two application forms and two production systems. A complete randomized block design was used with three replications; each experimental unit consisted of a pot with 3 L of soil. In general, dry matter yield, phosphorus content and nitrogen content were higher

¹Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola, Guatemala.

²Instituto de Recursos Naturales. Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo Edo. de México. [†](ronues@colpos.colpos.mx)

in the corn associated with lupine. *L. mutabilis* improved the efficiency of the RP homogeneously incorporated in the soil; however, RP efficiency was surpassed by triple superphosphate and by triple superphosphate plus rock phosphate.

Index words: *Lupinus mutabilis*, *Zea mays*, *phosphorus*, *rock phosphate*.

INTRODUCCION

En México, los andosoles representan cerca de 4.3% de la superficie total del país (Ortiz, 1981). La ubicación de estos suelos coincide con áreas densamente pobladas, como es el caso de la Meseta Tarasca en Michoacán y algunas regiones comprendidas a lo largo del eje neovolcánico, donde la producción agrícola es básicamente de autoconsumo. Debido a la presencia de minerales amorfos del tipo del alófono, silicato de aluminio hidratado que por su estado amorfo tiene una enorme superficie activa, es característica la adsorción de fosfatos en estos suelos, por lo que la disponibilidad de los fosfatos solubles añadidos, a través de fuentes comunes como el superfosfato simple y el superfosfato triple, es disminuida y se considera que sólo aproximadamente 8 a 10% del P aplicado es utilizado (Egawa, 1977; Etchevers, 1985; Núñez, 1985; Sample *et al.*, 1980).

La roca fosfórica puede provenir de diferentes yacimientos y, en consecuencia, presenta variaciones en la composición mineralógica y grado de cristalización de las apatitas, así como en la concentración de fósforo, naturaleza y concentración de las impurezas. Actualmente, se sabe que hay diferencias en la reactividad entre las distintas rocas fosfóricas. Las de Baja California Sur, después de ser concentradas por flotación, presentan una concentración de P_2O_5 aceptable (alrededor de 30%) para su aprovechamiento directo por los cultivos y también constituyen la materia prima para la fabricación de otros fertilizantes fosfatados.

La roca fosfórica, como fuente de fósforo para aplicación directa en Andosoles, ha demostrado ser una alternativa económicamente viable por su bajo costo y porque en México se cuenta con grandes depósitos. Sin embargo, resultados de investigaciones realizadas han mostrado que su eficiencia agronómica es inferior a la de los superfosfatos (Núñez, 1988). Esto ha motivado a realizar estudios que permitan identificar prácticas que favorezcan la reactividad de

las apatitas y, de esta forma, incrementar la solubilidad y eficiencia de la roca fosfórica. Dichos estudios han comprendido acciones como: acidulación parcial de la roca fosfórica con ácido sulfúrico, fosfórico o con azufre (solo o inoculado con *Thiobacillus*); su mezcla con estiércol en proceso de fermentación; adición de fertilizantes nitrogenados y fosfatados; inoculación con micorrizas y utilización de microorganismos que promuevan un medio ácido (Núñez, 1988).

El superfosfato triple es uno de los fertilizantes más utilizados para mezclarse con la roca fosfórica, debido a que suministra fósforo en forma inmediatamente aprovechable para los cultivos; además, al reaccionar en el suelo, favorece la solubilización de la roca fosfórica, ya que en las inmediaciones del gránulo de fertilizante la solución contiene ácido fosfórico que puede disminuir el pH de la solución hasta 1 (Cajuste, 1977; Hagin, 1985).

Desde épocas remotas se le ha atribuido al lupino la propiedad de mejorar la fertilidad del suelo; sus raíces tienen una gran capacidad de exploración, lo que le permite aprovechar los nutrimentos de las capas más profundas del suelo. Por ser leguminosa dispone de un abastecimiento propio de nitrógeno, asegurado por las bacterias noduladoras; se le atribuye la aptitud de transformar el potasio que se encuentra en el suelo y hacerlo disponible para la planta (Gross, 1982). Esta planta se adapta a condiciones de baja precipitación pluvial, suelos de baja fertilidad y a temperaturas entre -9.5 y 28 °C.; todas éstas, características propias de muchas áreas donde se desarrollan sistemas agrícolas de granos básicos, tanto en México como en otros países en desarrollo; sin embargo, la agricultura moderna lo ha ido desplazando.

Algunas investigaciones han permitido conocer que existen especies de lupino como *L. albus*, *L. cosentinii* y *L. angustifolius* que tienen la capacidad de movilizar y solubilizar fósforo de fuentes normalmente no aprovechables para otros cultivos, lo que les permite autoabastecerse de dicho nutrimento. Entre los mecanismos que estas plantas desarrollan están: absorción selectiva de cationes básicos, lo cual tiende a abatir el pH en la rizósfera (Aguilar, 1981); diferencia en biomasa del sistema radicular (Bolland, 1995; Hinsinger y Gilkes, 1995); desorción de fósforo de óxidos de Fe y Al por intercambio de aniones (Dinkelaker *et al.*, 1989; Jungk *et al.*, 1993); secreción de ácido cítrico, iones citrato y otros compuestos carboxilados (Dinkelaker *et al.*, 1989; Gardner, 1983; Gerke *et al.*, 1994), en cantidades equivalentes hasta

en 23% de su peso seco (en comparación, la alfalfa secreta el equivalente a 0.3% de su peso seco); fijación no fotosintética de carbono en las raíces y su exudación como citrato y malato (Johnson *et al.*, 1996); secreción de fosfatasa ácida (Tadano *et al.*, 1993; Ozawa *et al.*, 1995) y secreción de iones H^+ (Espinosa, 1997).

Más recientemente se ha demostrado que en condiciones de limitado suministro de fósforo, la especie *L. arboreus*, además de autoabastecerse de fósforo, lo deja disponible para otros cultivos que se encuentren en asociación con ella, resultando en una mayor producción de biomasa (Espinosa, 1997).

Evaluaciones con roca fosfórica de Carolina del Norte demostraron que *L. albus* y *L. angustifolius* disolvieron cantidades considerables de roca, más de 70% presente dentro de los 3 mm alrededor de las raíces, debido probablemente a la excreción de protones que provocaron un decremento del pH de la rizósfera (Hinsinger y Gilkes, 1995).

Con la finalidad de encontrar alternativas de manejo sostenible de la fertilización fosfatada en los Andosoles, en la presente investigación se evaluó el efecto de *Lupinus mutabilis* en asociación con *Zea mays* en la eficiencia agronómica de la roca fosfórica de Baja California como fuente de fósforo para ambas especies.

MATERIALES Y METODOS

El ensayo experimental se realizó en el invernadero del Colegio de Postgraduados (CP) en Montecillo, municipio de Texcoco, estado de México. Se prepararon macetas de 3 L de volumen de un Andosol de la Meseta Tarasca de Michoacán, México; algunas características químicas y físicas del mismo se presentan en el Cuadro 1. Por constituir el maíz el cultivo de mayor importancia en el área, se utilizó un criollo de esa zona como planta indicadora. La semilla de *Lupinus mutabilis*, empleada en los tratamientos de asociación (maíz + lupino) fue proporcionada por la Especialidad de Genética del CP. Los factores de estudio fueron:

a) Fuentes de fósforo (FF): superfosfato triple (SFT), roca fosfórica de Baja California (RF) y mezcla de ambas en proporciones de 50% de fósforo cada una. Las características de estos materiales se muestran en el Cuadro 2.

b) Dosis de fósforo (DF): 150, 300 y 450 kg de P_2O_5 ha⁻¹. Para los cálculos por maceta se asumió que una hectárea tiene un volumen de 2000 m³ de suelo

Cuadro 1. Algunas características físicas y químicas del suelo utilizado en el experimento.

Características	Unidades	Valor
pH (relación suelo agua 1:2)	-	5.8
Conductividad eléctrica (1:5) (25 °C)	dS m ⁻¹	0.16
Materia orgánica	%	8.3
Nitrógeno total (Kjeldahl)	%	0.42
P Olsen	mg kg ⁻¹	6
Arena	%	26
Limo	%	45
Arcilla	%	29
Clasificación textural	franco	franco
K intercambiable	cmol(+) kg ⁻¹	2.0
Sodio intercambiable	cmol(+) kg ⁻¹	0.5
Fe	mg kg ⁻¹	18
Cu	mg kg ⁻¹	0.4
Zn	mg kg ⁻¹	trazas
Mn	mg kg ⁻¹	6

en el cual se distribuye cada dosis de fertilizante (partiendo de una profundidad de 0.2 m se aplicaron 225, 450 y 675 mg de P_2O_5 maceta⁻¹).

c) Forma de aplicación (FA): incorporado (mezclado con todo el suelo) y localizado (abajo y a un lado de las semillas).

d) Sistema de cultivo: monocultivo de maíz y asociación de maíz con *L. mutabilis*. Para cada uno de los sistemas de producción se incluyeron testigos sin aplicación de fósforo.

Los factores de estudio generaron 38 tratamientos derivados de la factorial 3x3x2x2 más los tratamientos testigo de los dos sistemas, los cuales se distribuyeron en un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones.

Previo a la siembra se aplicaron los tratamientos de fertilización fosfatada de acuerdo con la modalidad de cada tratamiento (incorporado o localizado); en el caso de la aplicación incorporada, el suelo de la maceta se colocó en bolsas de plástico junto con el fertilizante y se procedió a agitar las mismas con el fin de lograr homogeneización; en la aplicación localizada, el fertilizante fue colocado 5 cm a un lado y debajo de la semilla. Por las cualidades del lupino de poder fijar nitrógeno y transformar el potasio que se encuentra en el suelo y hacerlo disponible para la planta, no se hicieron aplicaciones de dichos elementos.

La siembra de lupino se realizó el 1 de abril de 1999 con dos semillas en cada maceta de los tratamientos que incluyeron asociación. Veinte días después de la siembra, se hizo un raleo para dejar una planta; simultáneamente se sembró el maíz con

Cuadro 2. Características del superfosfato triple y de la roca fosfórica de Baja California utilizados en el experimento.

Material	Presentación	P ₂ O ₅ total	P hidrosoluble	P soluble citrato %	P insoluble citrato
Superfosfato triple (SFT)	Granulado	46	85	15	
Roca fosfórica (RF)	Polvo	27.7	trazas	2.4	25.3

dos semillas por maceta y se raleó 12 días después para dejar una planta. La razón de haber sembrado antes el lupino fue permitir que desarrollara su sistema radicular, para que el mismo pudiera favorecer la solubilización y movilización del fósforo, mismo que requeriría el maíz desde sus primeras etapas de crecimiento.

El suelo se mantuvo a capacidad de campo durante todo el experimento. El agua de riego utilizada se encontraba entre los parámetros que la definen como de buena calidad (C2S1) para uso agrícola. Durante el período experimental no se presentaron problemas de manejo ni fitosanitarios en ninguno de los cultivos.

Las plantas de maíz se cosecharon 36 días después de la siembra, considerando únicamente la parte aérea. El material vegetal se secó en un horno con ventilación forzada a 72 °C y posteriormente se cuantificó el peso seco. Las muestras vegetales secas se molieron y se sometieron a análisis de N y P. La determinación de nitrógeno se hizo por el método semi-microkjeldahl modificado para incluir nitratos (Bremner, 1965). La solubilización del P se realizó por digestión húmeda del material seco con una mezcla de ácidos perclórico y nítrico (Alcántar y Sandoval, 1999). Los extractos obtenidos se leyeron en un equipo de espectrofotometría de Inducción con Plasma Acoplado ICP-AES VarianTM Liberty II.

Para evaluar la eficiencia relativa de la RF simple y mezclada con SFT se comparó el contenido de P en los tratamientos donde se aplicaron las fuentes anteriores, con los correspondientes a SFT, considerados éstos como 100% eficientes. Previamente a todos los tratamientos se les restó el contenido de P que se encontró en el testigo sin fertilización fosfatada.

Para conocer el efecto de cada uno de los factores y las interacciones entre los mismos, los datos registrados para las variables evaluadas se organizaron y analizaron de acuerdo con el diseño de tratamientos mencionado anteriormente. El efecto de cada tratamiento con relación a testigos absolutos se analizó utilizando la técnica estadística de un diseño de bloques completos al azar (DBCA), agrupando los

tratamientos de acuerdo con su sistema de producción. Cuando las diferencias entre fuentes de variación fueron estadísticamente significativas (5% probabilidad de error) se procedió a efectuar comparaciones múltiples de medias utilizando para ello la prueba de Tukey al 5% de probabilidad (Steel y Torrie, 1981).

RESULTADOS Y DISCUSION

Rendimiento de Materia Seca

El rendimiento de materia seca en maíz fue afectado por la dosis de P₂O₅. La aplicación de 300 y 450 kg de P₂O₅ ha⁻¹, con rendimiento estadísticamente igual, superó a 150 kg de P₂O₅ ha⁻¹. En las tres fuentes evaluadas, la tendencia muestra un aumento en el rendimiento de materia seca conforme se incrementó la dosis de P₂O₅ hasta el nivel de 300 kg ha⁻¹ para RF y hasta 450 kg ha⁻¹ para SFT y SFT+RF. Cuando el fertilizante se incorporó homogéneamente al suelo, los incrementos en el rendimiento fueron ligeramente superiores en el maíz asociado a lupino que en el del monocultivo; aunque al analizar los sistemas en conjunto, estadísticamente resultaron iguales (Cuadro 3; Figuras 1a y 1b).

Aunque la planta respondió a la fertilización fosfatada en cualquiera de las formas de aplicación, se observó mayor respuesta cuando el fertilizante se aplicó en forma incorporada (Cuadro 3; Figuras 1c, 1d y 1f). El tamaño pequeño de la maceta influyó para que fuera más eficiente al incorporarlo homogéneamente en el suelo, ya que la solubilidad del fósforo es baja y es fácilmente retenido por el suelo, por lo que para su absorción debe estar próximo a las raíces de las plantas. En el presente caso, las raíces al crecer tuvieron acceso a la mayoría del volumen de suelo, por lo que aún al aplicarlo homogéneamente en todo el suelo se tuvo "localización" del fertilizante cerca de las raíces.

Entre los efectos positivos que conlleva la disponibilidad de fósforo, se tiene que hay un mayor desarrollo radicular, mayor crecimiento y desarrollo general de la planta y una mayor resistencia a las

Cuadro 3. Rendimiento de materia seca de maiz (g planta⁻¹) con distintas fuentes de fertilizante fosfatado, dosis, formas de aplicación y sistema de cultivo.

Fuente	Dosis kg ha ⁻¹	Monocultivo ¹		Asociado ¹		Sistemas		\bar{X}
		Incorporado	Localizado	Incorporado	Localizado	Incorporado	Localizado	
SFT	150	2.002 abcd	1.379 abcd	2.818 ab	1.144 cd	1.981	1.262	1.836
	300	2.154 abcd	2.556 abc	3.326 a	1.569 bcd	2.448	2.062	2.402
	450	2.920 a	2.870 ab	3.568 a	1.507 bcd	2.538	2.189	2.716
	\bar{X}	2.359	2.268	3.237	1.407	2.322	1.838	2.318 m
RF	150	0.831 d	0.641 d	1.404 cd	0.868 d	1.136	0.754	0.936
	300	1.154 cd	0.938 d	1.735 bcd	0.918 d	1.326	0.928	1.186
	450	1.297 bcd	0.711 d	1.925 bcd	0.944 d	1.435	0.828	1.220
	\bar{X}	1.094	0.763	1.688	0.910	1.299	0.837	1.114 o
SFT+RF	150	1.573 abcd	1.191 cd	1.898 bcd	1.067 d	1.482	1.129	1.432
	300	2.627 abc	1.796 abcd	2.465 abc	1.509 bcd	1.987	1.652	2.100
	450	2.595 abc	1.780 abcd	3.357 a	1.443 bcd	2.400	1.612	2.294
	\bar{X}	2.265	1.589	2.573	1.340	1.956	1.464	1.942 n
Fuentes	150	1.469	1.070	2.040	1.026	1.533	1.048	1.402 q
	300	1.978	1.763	2.509	1.332	1.921	1.548	1.896 p
	450	2.271	1.787	2.950	1.298	2.124	1.542	2.076 p
	\bar{X}	1.906	1.540	2.499	1.219	1.859 u	1.380 t	1.791
Testigo absoluto		0.578 d		0.677 d				0.628

CV = 27.3%
¹Cifras seguidas de las mismas letras son iguales estadísticamente (Tukey 0.05). DSH fuentes = 0.276. DSH dosis = 0.276. DSH forma de aplicación = 0.188. DSH sistemas = 0.188. DSH tratamientos dentro del sistema monocultivo = 1.600. DSH tratamientos dentro del sistema asociado = 1.390. letras a, b, c, d = Tratamientos dentro del sistema. m, n, o = Fuentes; como media general de dosis, sistema y forma de colocación. p, q = Dosis; como media general de sistema, fuente y forma de colocación. s, t = Formas de colocación; como media general de dosis, sistema y fuente. u, v = Sistema; media general de dosis, fuente y colocación.

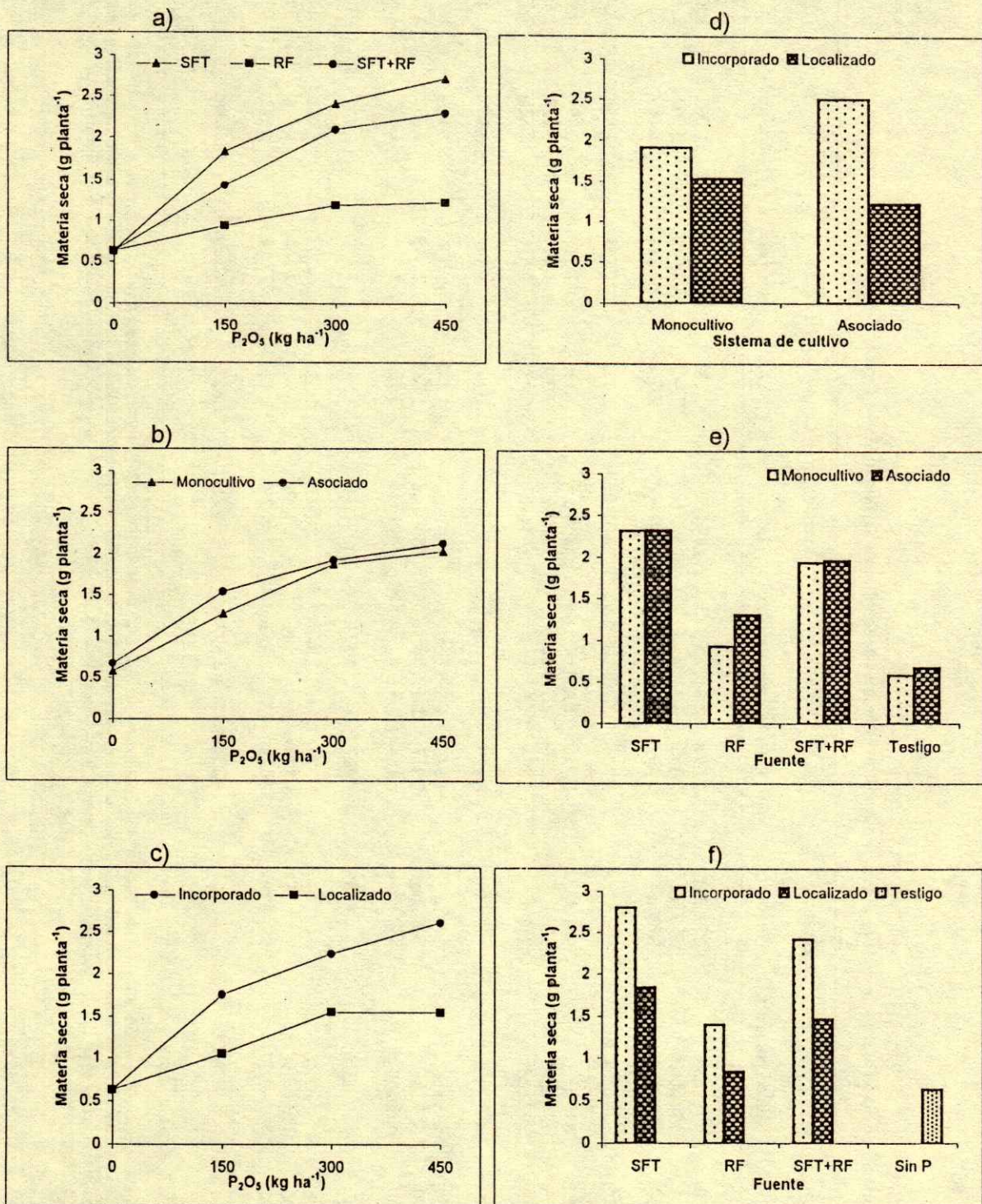


Figura 1. Efectos sobre el rendimiento de materia seca en plantas de maíz: a) dosis por fuente (DSH = 0.478), b) dosis por sistema (DSH = 0.326), c) dosis por forma de aplicación (DSH = 0.326), d) forma de aplicación por sistema (DSH = 0.266), e) fuente por sistema (DSH = 0.390), f) fuente por forma de aplicación (DSH = 0.390).

condiciones adversas (Yágodin, 1982). La aplicación localizada provocó un menor incremento en el rendimiento al concentrar el fósforo en un pequeño volumen de suelo cercano a las semillas.

A pesar de que el factor sistema no fue estadísticamente significativo en el rendimiento de materia seca en maíz, consistentemente la tendencia de la misma fue a ser superior cuando el maíz estuvo asociado con lupino (Cuadro 3; Figuras 1b y 1d).

Las fuentes evaluadas afectaron significativamente el rendimiento; SFT superó a SFT+RF que, a su vez, fue superior a RF. En el caso de las dos primeras, se observó una respuesta similar en los dos sistemas de producción; sin embargo, para la RF se tuvo una mejor respuesta cuando se aplicó al maíz asociado (Cuadro 3; Figura 1e). El comportamiento descrito anteriormente se atribuye a la relativamente alta concentración de fósforo soluble en agua presente en el SFT. Núñez (1988) señaló que los fertilizantes fosfatados solubles en agua son de acción rápida y son recomendados para cultivos de ciclo corto; pueden aplicarse en bandas, o bien, mezclados con el suelo. Los fertilizantes que poseen fósforo insoluble en agua, como la RF, deben emplearse en forma de polvos finos y bien mezclados con el suelo para aumentar su efectividad; su aplicación debe ser previa al cultivo para permitir su reacción. Aguilar (1981) señaló que las leguminosas en plena actividad de fijación simbiótica de nitrógeno absorben del suelo selectivamente cationes básicos, lo cual tiende a abatir el pH en la vecindad de las raíces, favoreciendo con ello la solubilización de la roca fosfórica.

En cada sistema de producción se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos con respecto al testigo sin fertilización fosfatada. En el maíz en monocultivo, el peso seco promedio de los mejores tratamientos (2.714 g) superó en más de 365% al testigo (0.578 g). En forma similar, en el maíz asociado, el promedio de los mejores tratamientos (3.107 g) superó en más de 355% al testigo (0.677 g). El peso seco del maíz asociado fue superior al del maíz en monocultivo cuando el fertilizante fue incorporado homogéneamente en el suelo. Por el contrario, en la aplicación localizada de SFT, el maíz en monocultivo tuvo un rendimiento de materia seca superior al del maíz asociado; esto mismo se observó en SFT+RF aunque en menor proporción (Cuadro 3).

Contenido de Fósforo

Esta variable fue afectada significativamente por la dosis de P_2O_5 . La aplicación de 300 ó 450 kg de P_2O_5 ha^{-1} , con efectos estadísticamente iguales, propició un mayor contenido de fósforo en la planta (Cuadro 4). La aplicación de SFT o SFT+RF mostró una relación directa entre el incremento de la dosis, hasta el nivel de 300 kg de P_2O_5 ha^{-1} , y la cantidad de fósforo en el tejido vegetal del maíz. En RF se observó respuesta al pasar de 300 a 450 kg de P_2O_5 ha^{-1} , pero la misma fue menor que la observada entre 150 y 300 kg de P_2O_5 ha^{-1} (Cuadro 4; Figura 2a). La cantidad de fósforo en el tejido vegetal del maíz asociado con lupino fue 19.5% superior en comparación con aquél cultivado en monocultivo (Cuadro 4; Figura 2b), la diferencia está determinada por aquellos tratamientos donde el fertilizante se incorporó homogéneamente al suelo (Figura 2d); lo que sugiere que el lupino favorece la absorción de P por el maíz.

En cualquiera de las dosis, sistemas de producción y fuentes evaluadas, la aplicación incorporada del fertilizante permitió a la planta disponer y extraer una mayor cantidad de fósforo en comparación con la aplicación localizada (Cuadro 4; Figuras 2c, 2d y 2f). Esto se explica, como se mencionó anteriormente, debido a que las raíces al crecer pudieron explorar la mayor parte de suelo (maceta de 3 L). En términos generales, incorporar el fertilizante superó en cerca de 75% a la aplicación localizada. La RF tuvo una efectividad cercana a 35% de la de SFT+RF.

Los resultados muestran que el contenido de fósforo en las plantas de maíz asociado con lupino fue mayor que el de aquéllas en monocultivo (Cuadro 4; Figuras 2b, 2d y 2e). Esto pudo deberse al beneficio de la fijación de nitrógeno atmosférico por parte del lupino, aunado al efecto del lupino sobre la disponibilidad del P para el maíz. En los testigos no se dio la misma situación pues en éstos no se aplicó fósforo.

Las fuentes fertilizantes afectaron significativamente el contenido de fósforo en la planta; el mismo fue mayor cuando se aplicó SFT o SFT+RF, estadísticamente iguales (Cuadro 4; Figura 2e). Esto se explica por el alto contenido de fósforo hidrosoluble presente en el SFT. Para las tres fuentes se observó mayor respuesta en el maíz asociado con lupino. Así mismo, las plantas de maíz asociado con lupino, fertilizadas con RF incorporada homogéneamente al suelo, incrementaron su

Cuadro 4. Contenido de fósforo en maíz (mg planta⁻¹) con distintas fuentes de fertilizante fosfatado, dosis, formas de aplicación y sistema de cultivo.

Fuente	Dosis kg ha ⁻¹	Monocultivo [†]		Asociado [†]		\bar{X} Sistemas		\bar{X}		
		Incorporado	Localizado	\bar{X}	Incorporado	Localizado	\bar{X}		Incorporado	Localizado
SFT	150	4.817 ab	1.172 c	2.994	5.442 bc	1.223 de	3.332	5.130	1.198	3.163
	300	4.860 ab	2.464 bc	3.662	9.335 a	2.131 cde	5.733	7.098	2.298	4.698
	450	6.860 a	2.727 bc	4.794	7.921 ab	1.515 de	4.718	7.390	2.121	4.756
RF	\bar{X}	5.512	2.121	3.817	7.566	1.623	4.594	6.539	1.872	4.206m
	150	1.072 c	0.455 c	0.764	1.651 de	0.551 e	1.101	1.362	0.503	0.932
	300	2.326 bc	0.637 c	1.482	2.828 cde	0.603 e	1.716	2.577	0.620	1.599
SFT+RF	450	2.452 bc	0.580 c	1.516	3.462 cde	0.620 e	2.041	2.957	0.600	1.778
	\bar{X}	1.950	0.557	1.254	2.647	0.591	1.619	2.299	0.574	1.436 n
	150	2.980 bc	1.123 c	2.052	4.077 cd	1.394 de	2.736	3.528	1.258	2.394
Fuentes	300	7.875 a	1.631 bc	4.753	7.842 ab	1.619 de	4.730	7.858	1.625	4.742
	450	6.820 a	1.412 c	4.116	8.602 ab	1.673 de	5.138	7.711	1.542	4.627
	\bar{X}	5.892	1.389	3.640	6.840	1.562	4.201	6.366	1.475	3.920m
\bar{X}	150	2.956	0.917	1.936	3.723	1.056	2.390	3.340	0.986	2.163 q
	300	5.020	1.577	3.298	6.668	1.451	4.060	5.844	1.514	3.679 p
	450	5.377	1.573	3.475	6.662	1.269	3.965	6.020	1.421	3.720 p
\bar{X}	4.451	1.356	2.904 v	5.684	1.259	3.471 u	5.068 s	1.307 t	3.188	
Testigo absoluto		0.476 c			0.341 e					0.408

CV = 35.1%

[†] Cifras seguidas de las mismas letras son iguales estadísticamente (Tukey 0.05). DSH fuentes = 0.6313. DSH dosis = 0.6313. DSH formas de aplicación = 0.4293. DSH sistemas = 0.4293. DSH tratamientos dentro del sistema monocultivo = 3.322. DSH tratamientos dentro del sistema asociado = 3.438. letras a, b, c, d = Tratamientos dentro del sistema. m, n, o = Fuentes; como media general de dosis, sistema y forma de colocación. p, q = Dosis; como media general de sistema, fuente y forma de colocación. s, t = Formas de colocación; como media general de dosis, sistema y fuente. u, v = Sistema; media general de dosis, fuente y colocación.

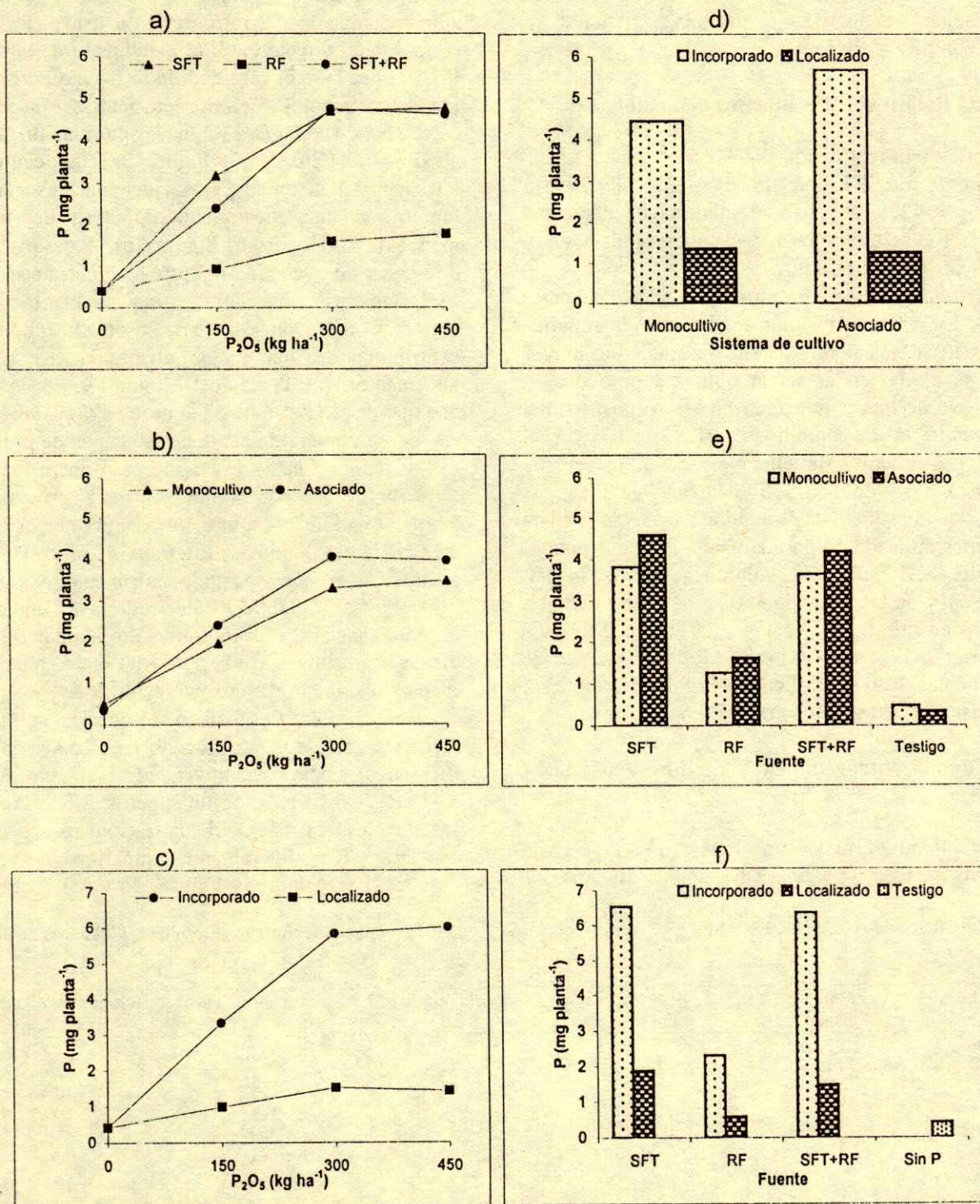


Figura 2. Efectos sobre el contenido de fósforo (P) en plantas de maíz: a) dosis por fuente (DSH = 1.09), b) dosis por sistema (DSH = 0.74), c) dosis por forma de aplicación (DSH = 0.74), d) forma de aplicación por sistema (DSH = 0.61), e) fuente por sistema (DSH = 0.89), f) fuente por forma de aplicación (DSH = 0.89).

contenido de fósforo más de 35% con relación a las del monocultivo (Cuadro 4). Esto último demuestra que la presencia de lupino aceleró la reacción de solubilización de la RF. Tendencia semejante se observó con SFT y SFT+RF.

Eficiencia Relativa de las Fuentes de Fósforo

La eficiencia relativa de la RF con respecto a SFT (asumiendo para SFT una eficiencia de 100%) varió entre 0% y 42%; se observó una mayor eficiencia cuando la RF se aplicó en forma incorporada y en el sistema maíz+lupino (Cuadro 5).

La mezcla SFT+RF mostró eficiencias entre 41.6% y 168.8% con relación a SFT, siendo superior en todos los casos a la RF; su eficiencia fue mayor cuando se aplicó en el sistema maíz+lupino que al monocultivo de maíz, indicando un efecto positivo del lupino sobre la disponibilidad del fósforo para el maíz. Por otra parte, la eficiencia de la mezcla de SFT+RF a dosis de 150 y 300 kg ha⁻¹ de P₂O₅ fue superior a la suma de las eficiencias de ambos fertilizantes aplicados separadamente, lo que denota el efecto del SFT sobre la solubilización de la RF (Cuadro 5). Con las dosis de 450 kg de P₂O₅ ha⁻¹ hubo dos casos en que la eficiencia de la mezcla SFT+RF fue inferior a la suma de los efectos individuales de ambas fuentes; esto se explica por la falta de respuesta a P al pasar de 300 a 450 kg de P₂O₅ ha⁻¹.

Contenido de Nitrógeno en el Tejido Vegetal del Maíz

La cantidad de nitrógeno en el tejido vegetal de las plantas de maíz se incrementó significativamente

al elevar la dosis de P₂O₅ de 0 a 150 y 300 kg ha⁻¹. La aplicación de 300 ó 450 kg de P₂O₅ ha⁻¹, con efectos estadísticamente iguales, propició un mejor aprovechamiento del nitrógeno. La tendencia muestra una relación directa entre el incremento de la dosis de P₂O₅ aplicada y la cantidad de nitrógeno en la planta. Estos incrementos fueron decrecientes, especialmente entre 300 y 450 kg de P₂O₅ ha⁻¹ y para las fuentes SFT y SFT+RF (Cuadro 6; Figura 3a). La cantidad de nitrógeno en el tejido vegetal del maíz asociado con lupino fue ligeramente superior a la del maíz en monocultivo (Cuadro 6; Figura 3b). A pesar de que la diferencia de contenido de nitrógeno entre sistemas no fue estadísticamente significativa, en la práctica esta variación a favor del maíz asociado pudo haber contribuido a una mejor absorción del resto de nutrimentos (por la Ley del Mínimo) y, por lo tanto, a una mayor producción de biomasa en la planta.

En cualquiera de las dosis, sistemas de producción y fuentes evaluadas, la aplicación incorporada del fertilizante fosfatado permitió al maíz, principalmente a aquel asociado a lupino, extraer una mayor cantidad de nitrógeno (Cuadro 6; Figuras 3c, 3d y 3f). Esto se atribuye a un mejor estado nutricional y desarrollo radicular de la planta. El efecto de la RF incorporada al maíz asociado con lupino resultó similar o superior estadísticamente a SFT y a SFT+RF cuando estas fuentes se aplicaron en forma localizada.

Las fuentes de fósforo afectaron significativamente la cantidad de nitrógeno en el maíz; la misma fue mayor cuando se aplicó SFT, el cual superó a SFT+RF que, a su vez, fue superior a RF. Para todas las fuentes, la cantidad de nitrógeno en el maíz asociado fue ligeramente superior que en el monocultivo (Cuadro 6; Figuras 3b y 3e). Esto mismo

Cuadro 5. Eficiencia relativa de RF y SFT+RF con respecto a SFT en el contenido de fósforo en el tejido vegetal aéreo de plantas de maíz.

Dosis P ₂ O ₅ kg ha ⁻¹	Forma de aplicación [†]	Sistema cultivo [‡]	Eficiencia relativa RF %	Eficiencia relativa SFT+RF	Relación mezcla/efectos individuales [§] %
150	Inc.	M	13.7	57.7	155.9
150	Inc.	A	25.7	73.2	109.5
150	Loc.	M	0	93.0	159.2
150	Loc.	A	23.8	119.4	138.7
300	Inc.	M	42.2	168.8	145.9
300	Inc.	A	27.7	83.4	102.7
300	Loc.	M	8.1	58.1	109.7
300	Loc.	A	14.6	71.4	119.4
450	Inc.	M	31.0	99.4	119.5
450	Inc.	A	41.2	109.0	95.2
450	Loc.	M	4.6	41.6	60.5
450	Loc.	A	23.8	113.5	100.2

[†] Inc. = Incorporado. Loc. = Localizado. [‡] M = Monocultivo. A = Asociado con lupino. [§] = Con base en datos ajustados a funciones polinomiales.

Cuadro 6. Contenido de nitrógeno en maíz (mg planta⁻¹) bajo distintas fuentes de fertilizante fosfatado, dosis, formas de aplicación y sistema de cultivo.

Fuente	Dosis	Monocultivo [†]		Asociado [†]		Sistemas		\bar{X}		
		Incorporado	Localizado	Incorporado	Localizado	Incorporado	Localizado			
		kg ha ⁻¹								
SFT	150	64.99 abcd	25.63 cde	45.31	82.35 abc	23.19 ef	52.77	73.67	24.41	49.04
	300	68.52 abc	50.64 abcde	59.58	121.53 a	35.26 def	78.40	95.02	42.95	68.99
	450	76.76 ab	68.80 abc	72.78	112.39 a	34.56 def	73.48	94.58	51.68	73.13
	\bar{X}	70.09	48.36	59.22	105.42	31.00	68.21	87.76	39.68	63.72 m
RF	150	21.97 de	13.56 e	17.76	33.67 ef	15.28 ef	24.48	27.82	14.42	21.12
	300	31.89 cde	17.00 e	24.44	45.06 cdef	19.19 ef	32.12	38.48	18.10	28.28
	450	45.22 abcde	15.73 e	30.48	50.08 bcd	19.16 ef	34.62	47.65	17.44	32.55
	\bar{X}	33.03	15.43	24.23	42.94	17.88	30.41	37.98	16.65	27.32 o
SFT+RF	150	45.71 abcde	27.03 cde	36.37	60.83 bcd	26.90 ef	43.86	53.27	26.96	40.12
	300	79.38 ab	45.13 abcde	62.26	80.09 abcd	35.63 def	57.86	79.74	40.38	60.06
	450	82.97 a	38.50 bcde	60.74	91.25 ab	29.80 ef	60.52	87.11	34.15	60.63
	\bar{X}	69.35	36.89	53.12	77.39	30.78	54.08	73.37	33.83	53.60 n
\bar{X} Fuentes	150	44.22	22.07	33.14	58.95	21.79	40.37	51.58	21.93	36.76 q
	300	59.93	37.59	48.76	82.23	30.03	56.13	71.08	33.81	52.44 p
	450	68.32	41.01	54.66	84.57	27.84	56.20	76.44	34.42	55.43 p
	\bar{X}	57.49	33.56	45.52 u	75.25	26.55	50.90 u	66.37 s	30.05 t	48.21
Testigo absoluto		10.80 e		10.80		13.56 i				12.18
CV = 30.8%										

[†] Cifras seguidas de las mismas letras son iguales estadísticamente (Tukey 0.05). DSH fuentes = 8.37. DSH dosis = 8.37. DSH formas de aplicación = 5.69. DSH sistemas = 5.69. DSH tratamientos dentro del sistema monocultivo = 44.37. DSH tratamientos dentro del sistema asociado = 45.84. letras a, b, c, d = Tratamientos dentro del sistema. m, n, o = Fuentes; como media general de dosis, sistema y forma de colocación. P, q = Dosis; como media general de sistema, fuente y forma de colocación. s, t = Formas de colocación; como media general de dosis, sistema y fuente. u, v = Sistema; media general de dosis, fuente y colocación.

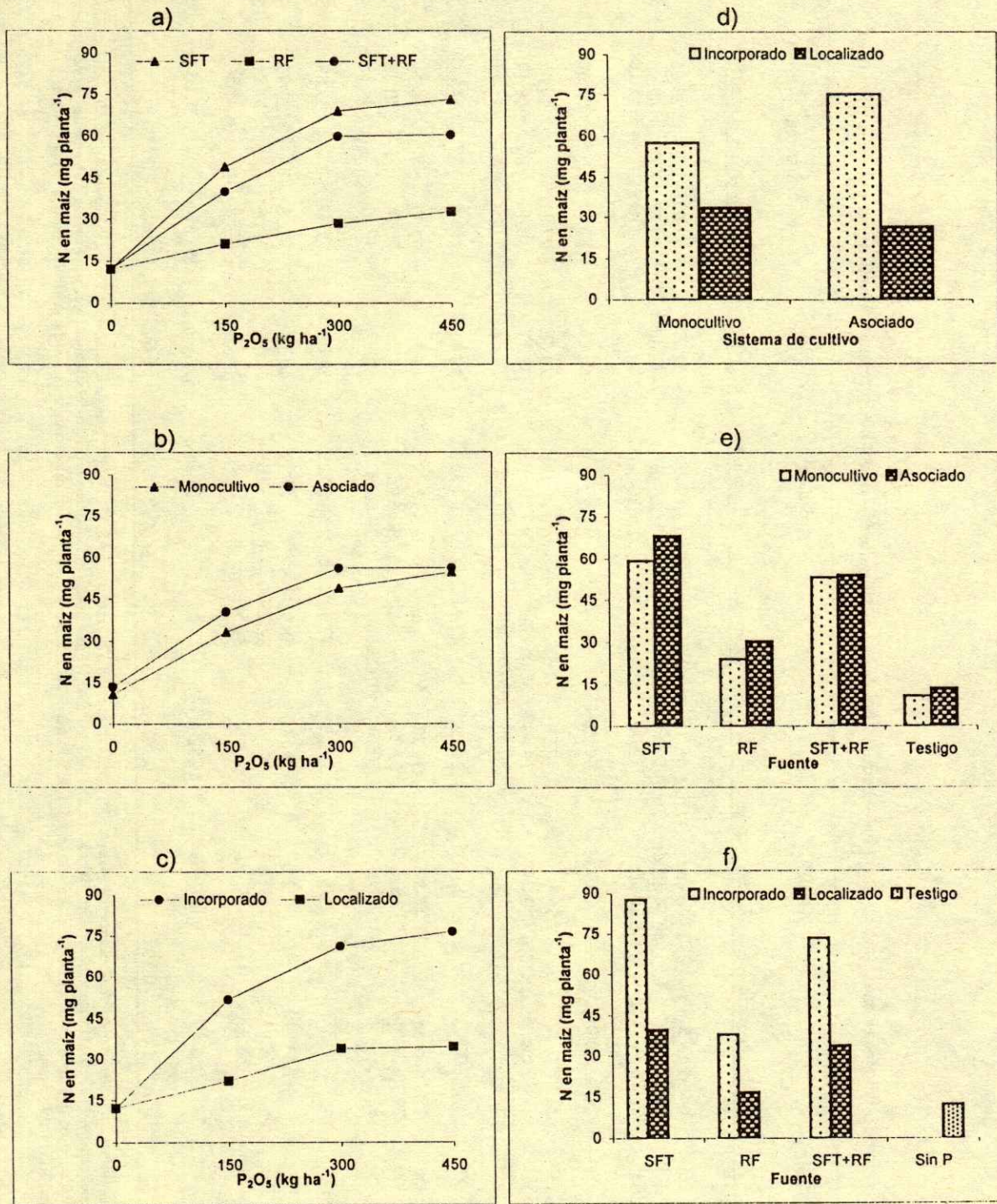


Figura 3. Efectos sobre el contenido de nitrógeno (N) en plantas de maíz: a) dosis por fuente (DSH = 14.50), b) dosis por sistema (DSH = 9.86), c) dosis por forma de aplicación (DSH = 9.86), d) forma de aplicación por sistema (DSH = 8.05), e) fuente por sistema (DSH = 11.84), f) fuente por forma de aplicación (DSH = 11.84).

también se observó al comparar los testigos de ambos sistemas, por lo que el comportamiento de éstos fue contrario al que manifestaron en el caso del contenido de fósforo.

El comportamiento anterior se atribuye, en parte, a la capacidad de fijación de nitrógeno por parte del lupino. Esta última característica pudo haber contribuido a un mejor aprovechamiento del fósforo en comparación con el maíz en monocultivo, dado a que tanto el nitrógeno como el fósforo son macronutrientes esenciales en las plantas. El efecto favorable de asociar lupino al maíz, sobre el contenido de N en éste, sólo se manifestó cuando el fertilizante fosfatado se incorporó al suelo. Con aplicación localizada no hubo ventaja de la asociación o aún llegó a ser desfavorable para la acumulación de N en maíz.

CONCLUSIONES

Lupinus mutabilis mejoró la eficiencia de la RF, principalmente cuando ésta fue incorporada homogéneamente en el suelo; sin embargo, fue inferior a SFT y SFT+RF, fuentes que también fueron más eficientes en el sistema de asocio. En general, el rendimiento de materia seca y el contenido de nitrógeno y de fósforo fueron mayores en el maíz asociado que en el monocultivo; estos beneficios sugieren que el maíz asociado aprovechó parte del nitrógeno fijado por el lupino, lo que le permitió una mayor absorción del fósforo aplicado y, por lo tanto, una mayor producción de biomasa. La asociación desfavoreció al maíz cuando se fertilizó con una fuente de fósforo de alta solubilidad y en forma localizada, debido quizá a una mayor competencia del sistema radical del lupino a tomar el fósforo fertilizante. La disponibilidad de fósforo para maíz fue mayor con la mezcla SFT+RF, que con la aplicación independiente de cada una de estas fuentes, denotando que el SFT favoreció la solubilidad del P de la RF.

RECONOCIMIENTO

Esta investigación fue financiada parcialmente por el proyecto CONACYT, Clave I 29843-B.

LITERATURA CITADA

Aguilar S., A. y A. van Diest. 1981. Rock-phosphate mobilization induced by the alkaline uptake pattern of legumes utilizing symbiotically fixed nitrogen. *Plant Soil* 61:27-42.

- Alcántar G., G. y M. Sandoval V. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Publicación especial 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, México.
- Bolland, M.D.A. 1995. *Lupinus cosentinii* more effectively utilizes low levels of phosphorus from superphosphate than *Lupinus angustifolius*. *J. Plant Nutrition* 18: 421-435.
- Bremner, J. 1965. Total nitrogen. pp. 1149-1178. In: C.A. Black (ed.). *Methods of soil analysis*. Agronomy 9. Part. 2. Am. Soc. Agron. Madison, Wisconsin.
- Cajuste, J.L. 1977. Química de suelos con un enfoque agrícola. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Dinkelaker, B., V. Romheld y H. Marschner. 1989. Citric acid excretion and precipitation of calcium citrate in the rhizosphere of white lupin (*Lupinus albus* L.). *Plant, Cell and Environ.* 12: 285-292.
- Egawa, T. 1977. Properties of soils derived from volcanic ash. pp. 10-63. In: Y. Ishizuka y C.A. Black (eds.). *Soils derived from volcanic ash in Japan*. CIMMYT. México.
- Espinosa, V. 1997. Nutritional ecology of legume species with particular reference to phosphorus. Ph. D. Thesis, Oxford, Inglaterra.
- Etchevers, J.D. 1985. Un cuarto de siglo de investigación en los suelos volcánicos de México. Serie de Cuadernos de Edafología 1, Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Gardner, W.K. 1983. The acquisition of phosphorus by *Lupinus albus* L. *Plant Soil* 70: 107-124; 391-402.
- Gerke, J., W. Romer y A. Jungk. 1994. The excretion of citric and malic acid by proteoid roots of *Lupinus albus*; effects on soil solution concentrations of phosphate, iron, and aluminum in the proteoid rhizosphere in samples of an Oxisol and a Luvisol. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 157-4: 289-294.
- Gross, R. 1982. El cultivo y la utilización del Tarwi *Lupinus mutabilis* Sweet. Estudio FAO: Producción y protección vegetal 36. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia.
- Hagin, J. 1985. Partially acidulated phosphate rock. A review. Technion Israel Institute of Technology. Haifa, Israel.
- Hinsinger, P. y R.J. Gilkes. 1995. Root-induced dissolution of phosphate rock in the rhizosphere of lupins grown in alkaline soil. *Aust. J. Soil Res.* 33: 477-489.
- Johnson, J.F., D.L. Allan, C.P. Vance y G. Weiblen. 1996. Root carbon dioxide fixation by phosphorus deficient *Lupinus albus*. Contribution to organic acid exudation by proteoid roots. *Plant Physiol.* 112: 19-30.
- Jungk, A., B. Seeling, J. Gerke y N.J. Barrow, 1993. Mobilization of different phosphate fractions in the rhizosphere. *Plant Soil* 54: 91-94; 155-156.
- Núñez E., R. 1985. Efectos de la acidez del suelo sobre la producción de cultivos y su corrección mediante el encalado. Serie de Cuadernos de Edafología 2. CEDAF, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Núñez E., R. 1988. Medidas para aumentar la eficiencia agronómica de roca fosfórica en aplicación directa. pp. 240-252. In: Memoria Congreso Internacional sobre la Industria de Fertilizantes. ADIFAL, La Paz, BCS, México.
- Ortiz S., C. 1981. Evaluación de la aptitud de las tierras de México para la producción de maíz, frijol y sorgo en condiciones de temporal. Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.

- Ozawa, K., M. Osaki, H. Matsui, M. Honma y T. Tadano. 1995. Purification and properties of acid phosphatase secreted from lupin roots under phosphorus deficiency conditions. *Soil Sci. Plant Nutrition* 41: 461-469.
- Sample, E.C., R.J. Soper y G.J. Racz. 1980. Reactions of phosphate fertilizers in soils. pp. 263-310. *In*: F.E. Khasawneh *et al.* (eds.). *The role of phosphorus in agriculture*. SSSA, Madison, Wi., USA.
- Steel, G.D. y J.H. Torrie. 1981. *Principles and procedures of statistics, a biometrical approach*. 2nd Int. Student ed. McGraw-Hill, Singapore.
- Tadano, T., K. Ozawa, H. Sakai, M. Osaki, H. Matsui y N.J. Barrow. 1993. Secretion of acid phosphatase by the roots of crop plants under phosphorus deficient conditions and some properties of the enzyme secreted by lupin roots. *Plant Soil* 54: 95-98.
- Yágodin, B.A. 1982. *Agroquímica*. Editorial Mir, Moscú. Traducción al español por Ramiro Rincón.

EFICIENCIA DE RECUPERACION DEL NITROGENO FERTILIZANTE EN SOCA DE CAÑA DE AZUCAR SOMETIDA A DIFERENTES MANEJOS DE FERTILIZACION

Nitrogen Fertilizer Recovery Efficiency by Sugar Cane Ratoon Submitted to Different Fertilization Management

Sergio Salgado García¹, Roberto Núñez Escobar², Juan J. Peña Cabriales³,
Jorge D. Etchevers Barra², David J. Palma López² y R. Marcos Soto²

RESUMEN

La eficiencia de recuperación del nitrógeno fertilizante (ERNF) por el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) usualmente varía de 12 a 40%, dependiendo de las condiciones climáticas, edáficas y de manejo. Las principales causas de esta baja eficiencia son las pérdidas por lixiviación, desnitrificación y volatilización. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el efecto de las fuentes, formas y épocas de aplicación del fertilizante nitrogenado sobre la ERNF en el cultivo de la caña de azúcar. El trabajo se realizó en las plantaciones cañeras de Tabasco, México, del 15 de mayo de 1997 al 8 de mayo de 1998. Dos experimentos factoriales 5*2 se establecieron en dos suelos, un Vertisol y un Inceptisol. El primero con cinco fuentes de N aplicadas al mes de edad de la planta: sulfato de amonio (SA), urea (U), complejo 20-10-10, U+Triple 17 y nitrato de potasio (NK), y dos formas de aplicación del fertilizante: superficial (sobre el surco) y enterrada a un lado del surco. El segundo experimento incluyó las mismas cinco fuentes de N, todas ellas en aplicación enterrada pero con dos épocas de aplicación: al mes y a los tres meses después del rebrote. Además, se incluyó un tratamiento testigo sin fertilización, para determinar la ERNF por el método de la diferencia. Así mismo, las fuentes SA, U y NK se marcaron con ¹⁵N para determinar la ERNF por el método isotópico en el Vertisol. La caña se cosechó a los 10.5 y 11.5 meses

de edad en el Vertisol e Inceptisol, respectivamente. Por el método de la diferencia se observó que las fuentes de nitrógeno no tuvieron efecto significativo sobre la ERNF; en cambio, la aplicación del fertilizante enterrado tuvo una ERNF 20% superior a la obtenida mediante la aplicación superficial. Por otra parte, la aplicación a los tres meses de edad tuvo una ERNF 16% superior a la observada con la aplicación hecha al mes de edad de la planta. Los resultados del método isotópico indican que las plantas desarrolladas en el Vertisol, contenían 12.2 kg ha⁻¹ de N derivado del fertilizante y 118.7 kg ha⁻¹ de N derivado del suelo. Con el método isotópico no se encontró efecto significativo de las fuentes SA, U y NK, ni de sus formas y momentos de aplicación sobre la ERNF, con una media de 9.5%. A los 6.5 meses de edad, la planta mostró una ERNF mayor que la evaluada a los 10.5 meses de edad, lo que sugiere que ocurrió un proceso de dilución en el contenido de ¹⁵N. A los 6.5 meses de edad de la planta, se observó que el fertilizante, aplicado a los tres meses de edad, tuvo una ERNF superior a la obtenida cuando el fertilizante se aplicó al mes de edad. La ERNF determinada por el método de la diferencia fue mayor que la determinada por el método isotópico, alcanzando una media general de 21.2%.

Palabras clave: *Saccharum officinarum*, *isótopo*, *fuentes de nitrógeno*, *épocas de aplicación*.

SUMMARY

Fertilizer nitrogen recovery efficiency (FNRE) in sugar cane usually ranges from 12 to 40% depending on climatic, edaphic, and management conditions. The main reasons for this low efficiency are losses from leaching, denitrification, and volatilization. The present research work was aimed to assess the effect of fertilizer nitrogen sources, methods and dates of

¹ Campus Tabasco, Colegio de Postgraduados. H. Cárdenas, Tabasco. (salgados@colpos.colpos.mx)

² Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, 56230 Montecillo, Edo. de México.

³ Laboratorio de Ecología Microbiana CINVESTAV-IPN. Irapuato, Guanajuato.

application on the FNRE by the sugar cane (*Saccharum officinarum* L.) crop. The field work was carried out on the sugar cane plantations of Tabasco State, Mexico. Two 5*2 factorial experiments were established in two soils, Vertisol and Inceptisol. The first experiment tested five N sources applied one month after harvesting: ammonium sulphate (AS), urea (U), 20-10-10 complex, U+Triple 17, and potassium nitrate (KN), and two fertilizer application methods: superficial, on top of furrow, and buried in the furrow slope. The second experiment included the same five N sources, all of them buried, but applied on two dates: one month and three months after growth initiation. In addition, a check treatment without fertilization was included in order to assess FNRE by the difference method. AS, U, and KN were tagged with ^{15}N for FNRE determination by the isotopic method in Vertisol. Sugar cane was harvested when plants were 10.5 and 11.5 months old, respectively. When applying the method of difference with the check treatment, there was no significant effect of N sources on the FNRE; however, when fertilizer was buried, it had a FNRE 20% higher than superficial application. On the other hand, fertilizer N, applied to 3-month-old plants, had a FNRE 16% higher than N fertilizer applied to one-month-old plants. Results with the isotopic method in Vertisol reveal that the plants contained 12.2 kg ha^{-1} of N derived from the fertilizer and 118.7 kg ha^{-1} of N derived from the soil. With the isotopic method no significant differences in FNRE were found among the AS, U or KN nitrogen sources, nor between the methods or dates of application, with a general mean FNRE of 9.5%. When plants were 6.5 months old, they had a FNRE higher than the one assessed in 10.5-month old plants, suggesting the occurrence of a ^{15}N dilution process. When plants were 6.5 months old they exhibited a higher FNRE with N applications made three months after initial regrowth than applications made one month after initial regrowth. FNRE values obtained by the difference method were higher than those obtained by the isotopic method, reaching a general mean FNRE of 21.2%.

Index words: *Saccharum officinarum*, isotopic nitrogen, nitrogen sources, fertilization dates.

INTRODUCCION

Los fertilizantes químicos son una de las mejores opciones para incrementar y mantener el rendimiento de caña y de sacarosa en el corto plazo (Salgado *et al.*, 1995). Sin embargo, la fertilización de la caña de azúcar en el área de influencia del ingenio Pdte. Benito Juárez de Tabasco (aproximadamente 14 mil ha) se ha hecho por más de 15 años con sólo una dosis de 120, 22 y 50 kg ha^{-1} de N, P y K, respectivamente, sin considerar la producción, la variedad y el tipo de suelo. Es común que las aplicaciones de fertilizantes se hagan extemporáneamente debido al retraso en su suministro, que se esparzan superficialmente por la escasa aceptación que tiene la mecanización en la zona, que se empleen fuentes de fertilizantes complejos como el 20-10-10, que tiene problemas de higroscopicidad y que dificultan su manejo, y que se combinen productos fertilizantes como urea más triple 17, todo lo cual afecta la eficiencia con que el cultivo usa los fertilizantes. La eficiencia de utilización del fertilizante es la absorción real de los nutrimentos del fertilizante por la planta con relación a la cantidad de nutrimentos que se añade al suelo (Zapata, 1990). Con esta fertilización y el manejo que se emplea en el ingenio, el rendimiento promedio de la caña de azúcar es 65 Mg ha^{-1} con 8.5% de sacarosa, que se considera bajo si se compara con el obtenido por otros ingenios de la zona. Los productores aseguran que la caña resulta de menor peso cuando se fertiliza con materiales complejos que cuando se utiliza la urea mezclada con triple 17. Estos antecedentes, aunados al incremento en el precio de los fertilizantes y los inminentes riesgos de contaminación al ambiente cuando se usan indiscriminadamente, hacen patente la necesidad de mejorar la eficiencia de aprovechamiento de los fertilizantes. Estudios realizados en otros países con el isótopo ^{15}N indican que la eficiencia de utilización del fertilizante nitrogenado por el cultivo de caña de azúcar puede variar de 12 a 40% dependiendo de las condiciones climáticas y edáficas. Las principales causas de esta baja eficiencia son las pérdidas de N por lixiviación, desnitrificación y volatilización (Rivera *et al.*, 1991; Frency *et al.*, 1992; Chapman *et al.*, 1994; Weier *et al.*, 1996; Anderson, 1997; Hatch *et al.*, 1998). Para México, se reporta una eficiencia de uso de los fertilizantes de aproximadamente 50% para el N (García, 1984). Para evaluar la eficiencia de utilización del fertilizante pueden utilizarse dos

métodos: el método de la diferencia y el isotópico. El primero es un método indirecto, aquí la cantidad absorbida de nutrimentos por el cultivo en la parcela control (sin aplicación de fertilizantes) se sustrae de la cantidad absorbida en cada tratamiento con fertilización (Bartholomew y Clark, 1965). Se supone que la absorción de nutrimentos de la parcela control indica la cantidad de nutrimentos disponibles del suelo, en tanto que la de los tratamientos fertilizados indica la cantidad de nutrimentos disponibles del suelo y del fertilizante. Este método supone, además, que todas las transformaciones de nutrimentos disponibles en el suelo, o sea la mineralización, la inmovilización y otros procesos en el caso de nitrógeno, son iguales tanto en los suelos fertilizados como en los no fertilizados. El método isotópico es el único método directo para medir la absorción de nutrimentos de los fertilizantes aplicados. En las últimas décadas se han llevado a cabo numerosos trabajos en los que se usan fertilizantes marcados con el isótopo estable ^{15}N y fertilizantes fosfatados marcados con los isótopos radiactivos ^{32}P , ^{33}P , ^{45}Ca y ^{32}S . Zapata (1990) y Bowen y Zapata (1991) detallaron ampliamente las ventajas de esta técnica. La técnica isotópica consiste en añadir al suelo un fertilizante marcado y determinar la cantidad del nutrimento que la planta absorbe de este fertilizante mediante un análisis de las muestras vegetales en el espectrómetro de masas o de emisión en el caso de los isótopos estables y en un contador Geiger para determinar las emisiones radiactivas. Ante la necesidad de contar con mayor información que contribuya a mejorar los programas de fertilización de los ingenios azucareros, se planteó el presente trabajo, cuyo objetivo fue: evaluar la eficiencia de recuperación del nitrógenofertilizante (ERNF) a través del método de la diferencia y del isotópico en Tabasco, México, cuando el cultivo de la caña de azúcar se somete a diferentes manejos de fertilización.

MATERIALES Y METODOS

Del 15 de mayo de 1997 al 8 de mayo de 1998, se condujeron dos experimentos en la zona cañera del ingenio Pdte. Benito Juárez de Tabasco, México. El primero en un Vertisol de textura arcillosa, pH en agua de 6.8, $< 8.3 \text{ mg kg}^{-1}$ de P-Olsen y $< 0.3 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ de suelo de K intercambiable, cultivado con soca de la variedad Méx 69-290. El segundo en un Inceptisol, con textura franca, pH en agua de 5.8, $< 1.0\%$ de materia orgánica (MO),

$< 1.0 \text{ mg kg}^{-1}$ de P-Olsen, $< 0.27 \text{ cmol}_{(+)} \text{ kg}^{-1}$ de suelo de K intercambiable, cultivado con la resoca 3 de la variedad Méx 68-P-23.

Los 16 tratamientos ensayados (Cuadro 1) se distribuyeron en el campo en un diseño de bloques completos al azar, con cuatro repeticiones. El tamaño de la parcela experimental fue de seis surcos de 1.3 m de ancho por 10 m de largo, para cosechar los cuatro surcos centrales por 8 m de largo para evitar el efecto de borde. Para medir la eficiencia de la fertilización nitrogenada por el método isotópico se establecieron dentro de las parcelas normales del Vertisol, microparcels de un surco por 2 m de largo. La urea (U) y el sulfato de amonio (SA) se marcaron con 1.11 y 1.03% de exceso atómico (e.a) de ^{15}N y el nitrato de potasio (NK) con 4.11% e.a ^{15}N . La fuente enriquecida se aplicó en forma sólida para simular la aplicación del fertilizante por el productor. Después de la cosecha de la caña, en 1997 y antes del inicio de los experimentos, se realizaron las labores habituales de la región (Salgado, 1995).

Durante el período de crecimiento del cultivo de mayo a diciembre de 1997, la precipitación acumulada fue 1899 mm, la que cubrió satisfaciendo los requerimientos hídricos del cultivo; en el Vertisol se presentaron excesos de humedad que hicieron necesario realizar un drenaje superficial.

Cuadro 1. Tratamientos estudiados de manejo de fertilización en caña de azúcar.

Dosis N-P ₂ O ₅ -K ₂ O kg ha ⁻¹	Fuentes de NPK	Forma de aplicación	Época de aplicación
0-0-0	-	-	-
160-80-80	SA SPT KCl [†]	Enterrado	1 mes
160-80-80	U SPT KCl [†]	Enterrado	1 mes
160-80-80	20-10-10	Enterrado	1 mes
160-80-463	NK SPT [†]	Enterrado	1 mes
160-80-80	U SPT KCl	Enterrado	1 mes
160-80-80	SA SPT KCl [†]	Superficial	1 mes
160-80-80	U SPT KCl [†]	Superficial	1 mes
160-80-80	20-10-10	Superficial	1 mes
160-80-463	NK SPT [†]	Superficial	1 mes
160-80-80	U SPT KCl	Superficial	1 mes
160-80-80	SA SPT KCl [†]	Enterrado	3 meses
160-80-80	U SPT KCl [†]	Enterrado	3 meses
160-80-80	20-10-10	Enterrado	3 meses
160-80-463	NK SPT [†]	Enterrado	3 meses
160-80-80	U SPT KCl	Enterrado	3 meses

SA = Sulfato de amonio. SPT = Superfosfato triple. KCl = Cloruro de potasio. U = Urea. NK = Nitrato de potasio. 20-10-10 = Fertilizante complejo.

[†]Tratamientos con aplicación de ^{15}N .

En contraste, de enero a abril de 1998, la precipitación acumulada fue de 37 mm de lluvia, la cual resultó favorable para el cultivo. En este período, se realizó el proceso de maduración de la caña. Las temperaturas durante el período de crecimiento se mantuvieron por arriba de 20 °C, por lo que el cultivo no se retrasó en su crecimiento y se desarrolló normalmente. La cosecha se realizó entre abril y mayo de 1998. Las variables experimentales fueron las siguientes:

Rendimiento de Campo

En la parcela útil se midió el rendimiento de los tallos de caña y de paja que se pesaron en una balanza de reloj de capacidad de 100 kg; posteriormente, el rendimiento se transformó a Mg ha⁻¹, que sirvió de base para calcular la extracción de N.

Concentración de N en Planta

De las muestras colectadas 10 días antes de la cosecha, se tomó una submuestra de seis cañas (tallo y paja), la que se molió por separado en una picadora tipo Chetumal, equipo que permite pulverizar los tallos de caña. De esta muestra se tomaron 600 g y se envasaron en bolsas de papel, para ser secados en la estufa a 70 °C hasta que alcanzaron peso constante, se calculó el porcentaje de humedad y materia seca. La muestra se molió en el molino Wiley, con tamiz de 2 mm, antes de determinar el contenido de N. Los análisis se hicieron de acuerdo con los métodos adaptados por Etchevers (1988).

Las microparcels con ¹⁵N se cosecharon utilizando el mismo procedimiento descrito anteriormente; excepto que para la molienda de las muestras, éstas se agruparon de menor a mayor porcentaje e.a de ¹⁵N para evitar contaminación cruzada. Antes de cada molienda de un mismo tratamiento con la fuente marcada se lavó el molino con alcohol, para evitar la contaminación entre muestras. Una vez molidas, las muestras se empaquetaron y se enviaron al laboratorio para la determinación del porcentaje e.a de ¹⁵N; se emplearon los procedimientos rutinarios para solubilizar la muestra y la detección del ¹⁵N se hizo en un espectrómetro de emisión NOI-6E. La eficiencia de recuperación del N fertilizante (ERNF) se determinó por el método de la diferencia (Bartholomew y Clark, 1965) y el método isotópico para el ¹⁵N (Zapata, 1990).

Para el análisis estadístico de los datos se utilizó la versión 6.11 del paquete SAS (1996). Para el cálculo de la ERNF por el método de la diferencia se consideraron dos análisis factoriales 5*2 (cinco fuentes de nitrógeno y dos formas de aplicación, y cinco fuentes de nitrógeno y dos épocas de aplicación). Para los datos de la ERNF por el método isotópico se hicieron dos análisis factoriales 3*2 (tres fuentes de nitrógeno y dos formas de aplicación, y tres fuentes de nitrógeno y dos épocas de aplicación). En todos los casos se aplicó la prueba de separación de medias de Tukey.

RESULTADOS Y DISCUSION

Eficiencia de Recuperación del Nitrógeno Fertilizante por el Método de la Diferencia

La variedad Méx 69-290, cultivada en el Vertisol y fertilizada cuando la soca tenía un mes de edad, únicamente presentó diferencias significativas en su ERNF, por efecto de la forma de aplicación del fertilizante, logrando un incremento de 27% en la ERNF cuando el fertilizante se enterró (Cuadro 2), con respecto a la ERNF obtenida cuando el fertilizante se aplicó superficialmente, que sólo fue de 2.4%. Al enterrar el fertilizante se reducen las pérdidas por volatilización de N, lo cual explicaría la gran diferencia observada (GEPLACEA, 1992; McMahon, 1995). Así mismo, la ERNF en la variedad Méx 68-P-23 cultivada en el Inceptisol presentó las mismas tendencias pero de menor magnitud con una media de 7.4%, lo cual se atribuye a su menor fertilidad y a la posibilidad de que ocurra la lixiviación de N, por la textura franca de este suelo. Cabe destacar que los coeficientes de variación (CV) oscilaron entre 15.3 y 261.4%, lo cual no es extraño en este tipo de experimentos de campo. El efecto de fuentes de nitrógeno en la ERNF no fue significativo; la tendencia observada fue que la menor ERNF se obtuvo con el NK en los dos tipos de suelo y las mayores ERNF con las mezclas de SA y U con 12.8 y 13.7%, respectivamente (Cuadro 2). Lo anterior puede deberse a dos razones: a) el NH₄⁺ del SA y U pueden retenerse en sitios de intercambio, lo que impide parcialmente ser perdida. Además estimula la absorción de H₂PO₄⁻, mejorando la nutrición de la caña, mientras que con el nitrato ocurre lo contrario (Hageman, 1984); y b) a la mayor movilidad del NO₃⁻ del NK que pudo facilitar la pérdida de N por

Cuadro 2. Efecto de las fuentes de N y formas de aplicación del fertilizante aplicado al mes de edad, sobre la eficiencia de recuperación del N fertilizante (ERNF), método de la diferencia.

Efectos factoriales	ERNF	
	Vertisol Méx 69-290	Inceptisol Méx 68-P-23
----- % -----		
Fuentes de NPK (Fu)		
SA SPT KCl	22.9 a [†]	12.8 a
U SPT KCl	18.3 a	13.7 a
20-10-10	11.7 a	8.3 a
NK SPT	10.4 a	-5.1 a
U+ Triple 17	16.3 a	7.5 a
Forma de aplicación (Fo)		
Enterrado	29.3 a	15.4 a
Superficial	2.4 b	-0.5 b
Media:	15.9	7.4
CV (%):	171.0	261.4
DSH (Fu):	39.9	28.5
DSH (Fo):	17.7	12.6
Prob. de F:		
Fuentes (Fu):	0.88 ns	0.33 ns
Formas (Fo):	0.01 **	0.01 **
Fu*Fo:	0.68 ns	0.13 ns

[†] Medias con la misma letra dentro de la misma columna son iguales estadísticamente Tukey.

* Efectos significativos (P < 0.05). ** Efectos altamente significativos (P < 0.01). ns = No significativo.

desnitrificación en el Vertisol y por lixiviación en el Inceptisol (Weier *et al.*, 1996).

Ambas variedades con fertilizante aplicado subsuperficialmente no presentaron diferencias significativas, debido al efecto de fuente o a la interacción fuentes x épocas (Cuadro 3). Chapman y Hayson (1991) y Sulroca (1995) reportaron resultados similares. No obstante, las medias de la ERNF, 33.3 y 27.7%, en las variedades Méx 69-290 y Méx 68-P-23, respectivamente, cuando el fertilizante se enterró a los tres meses de edad, fueron más altas que las observadas con cualquier forma de aplicación del fertilizante, hecha al mes de edad (Cuadro 2). Lo anterior implica que la aplicación del fertilizante al macollamiento (tres meses de edad), es más efectiva para aumentar la ERNF debido a que el cultivo cuenta con un sistema radical más activo y mejor distribuido para aprovechar el N del fertilizante, el cual permanece en una zona de concentración no mayor de 40 cm de profundidad, lo que permite reducir el riesgo de lixiviación (Salgado *et al.*, 1997). Además, al enterrar el fertilizante se disminuyen las pérdidas por volatilización.

Cuadro 3. Efecto de las fuentes de N y épocas de aplicación del fertilizante (enterrado) en la eficiencia de recuperación del N fertilizante (ERNF), método de la diferencia.

Efectos factoriales	ERNF	
	Vertisol Méx 69-290	Inceptisol Méx 68-P-23
----- % -----		
Fuentes de NPK		
SA SPT KCl	52.2 a [†]	43.9 a
U SPT KCl	35.2 a	36.8 a
20-10-10	20.7 a	24.5 a
NK SPT	30.0 a	10.6 a
U+ Triple 17	30.4 a	20.3 a
Épocas de aplicación		
1 mes	29.3 a	15.4 b
3 meses	38.0 a	39.0 a
Media:	33.7	27.7
CV (%):	90.0	90.7
DSH (Fuentes)	44.3	36.1
DSH (Épocas)	19.7	16.0
Prob. de F:		
Fuentes	0.34 ns	0.08 ns
Épocas	0.37 ns	0.01 **
Fuentes*Épocas	0.87 ns	0.27 ns

[†] Medias con la misma letra dentro de la misma columna son iguales estadísticamente. Tukey.

* Efectos significativos (P < 0.05). ** Efectos altamente significativos (P < 0.01). ns = No significativo.

N Derivado del Fertilizante (Nddf), Método Isotópico

No se encontró respuesta significativa al Nddf en los diferentes manejos de fertilización (Cuadros 4 y 5). Se observó que la media de Nddf de los

Cuadro 4. Efecto de las fuentes de N y formas de aplicación del fertilizante aplicado al mes de edad sobre la eficiencia de recuperación del N fertilizante (ERNF) a los 10.5 meses en la variedad Méx 69-290 cultivada en el Vertisol.

Efectos factoriales	Nddf [†]	Ndds	ERNF
			Método isotópico
			----- % -----
			kg ha ⁻¹
Fuentes de NPK			
SA SPT KCl	8.2 a [†]	114.4 a	6.0 a
U SPT KCl	13.6 a	101.4 a	9.5 a
NK SPT	10.2 a	92.3 a	9.4 a
Forma de aplicación			
Enterrado	11.4 a	131.8 a	8.4 a
Superficial	9.9 a	73.8 a	8.2 a
Media:	10.6	102.8	8.3
C.V (%):	71.7	39.4	75.0
DSH (Fuentes)	9.9	62.7	8.1
DSH (Formas)	6.6	35.3	0.46 ns
Prob. de F:			0.94 ns
Fuentes	0.38 ns	0.56 ns	0.16 ns
Formas	0.62 ns	0.01 **	
Fuentes*Formas	0.72 ns	0.94 ns	

[†] Nddf = N derivado del fertilizante. Ndds = N derivado del suelo.

[†] Medias con la misma letra dentro de columna son iguales estadísticamente. Tukey (P < 0.05).

* Efectos significativos (P < 0.05). ns = No significativo.

Cuadro 5. Efecto de las fuentes de N y épocas de aplicación del fertilizante enterrado, sobre la eficiencia de recuperación del N fertilizante (ERNF) a los 6.5 y 10.5 meses de edad en la variedad Méx 69-290 cultivada en el Vertisol.

Efectos factoriales	Fechas	6.5 meses de edad				10.5 meses de edad		
		Nddf [†]	Ndds	ERNF		Nddf	Ndds	ERNF
		kg ha ⁻¹		Método isotópico	Método de diferencia	kg ha ⁻¹		Método isotópico
				%			%	
Fuentes de NPK	SA SPT KCl	36.7 a [†]	121.5 a	22.9 a	48.8 a	12.8 a	156.5 a	9.0 a
	U SPT KCl	30.1 a	102.0 ab	18.8 a	32.6 b	17.0 a	125.6 a	15.2 a
	NK SPT	25.5 a	99.5 b	15.9 a	28.3 b	11.6 a	122.3 a	9.6 a
Epoca de aplicación	1 mes	24.9 b	77.7 b	15.5 b	14.2 b	11.4 a	131.8 a	8.4 a
	3 meses	36.7 a	137.8 a	22.9 a	58.9 a	16.2 a	137.6 a	12.8 a
Media:		30.8	107.6	19.2	36.6	13.8	134.7	10.6
CV (%):		38.1	15.3	38.1	30.4	67.7	34.5	66.4
DSH (Fuentes)		10.0	21.4	9.3	14.2	12.1	60.4	9.1
DSH (Epocas)		15.0	14.4	6.3	9.5	8.1	40.4	6.1
Prob. de F:								
Fuentes		0.18 ns	0.03 *	0.18 ns	0.01 **	0.49 ns	0.29 ns	0.45 ns
Epocas		0.02 *	0.01 **	0.02 *	0.01 **	0.23 ns	0.76 ns	0.14 ns
Fuentes*Epocas		0.38 ns	0.39 ns	0.38 ns	0.91 ns	0.83 ns	0.76 ns	0.75 ns

[†] Nddf = N derivado del fertilizante. Ndds = N derivado del suelo.

[†] Medias con la misma letra dentro de columna son iguales estadísticamente. Tukey (P < 0.05).

* Efectos significativos (P < 0.05). ns = No significativo.

tratamientos con fuentes y épocas de aplicación a 6.5 meses de edad fue 30.8 kg ha⁻¹ de N, cantidad mayor que la encontrada a 10.5 meses de edad. Esto indica que al iniciar el proceso de maduración, el cultivo disminuye su concentración de N. Parte de este N se transfiere a las raíces y al suelo (Wetselaar y Farquhar, 1980), pero también hay un efecto de dilución por el aumento de la producción de biomasa. Estos hechos posiblemente repercuten en el cálculo de la ERNF. Al respecto, Rivera *et al.* (1991), en Cuba, observaron que únicamente 5% del Nddf contribuía a la nutrición nitrogenada del cultivo de caña, ya que gran parte del N aplicado disminuía del suelo cuatro meses después de su aplicación. En el Cuadro 5, se presentan las mediciones de la ERNF hechas a los 10.5 meses de edad de la planta en Tabasco, México. Hubo cierta tendencia del Nddf a que en el tratamiento de aplicación subsuperficial (enterrado), que se hizo a los tres meses de edad, superase la ERNF lograda con la aplicación al mes de edad; esto indica una tendencia de la caña a consumir más N del fertilizante con esa tecnología, porque el fertilizante, aplicado a los tres meses de edad, tiende a permanecer en capas más superficiales del suelo, con mejor acceso al sistema radical del cultivo (Rivera y Treto, 1989; Salgado *et al.*, 1997).

N Derivado del Suelo (Ndds), Método Isotópico

Las plantas del tratamiento testigo, establecidas en el Vertisol, extrajeron del suelo 85.9 kg ha⁻¹ de N. En cambio, en los Cuadros 4 y 5, que se refieren a la utilización de la técnica isotópica para medir la ERNF, se encontró que el aporte de N del suelo a las plantas fertilizadas se ubicaba en el rango de 92.3 a 156.1 kg ha⁻¹. Esta diferencia constituye lo que Jenkinson *et al.* (1985) llamaron interacción del nitrógeno añadido del fertilizante con el N del suelo (ANIS aparente) y se debe a que una planta fertilizada desarrolla un sistema radical más abundante que el testigo y, por lo tanto, es más hábil para absorber N nativo del suelo. Por otra parte, la adición de fertilizante estimula la actividad microbiana y favorece la disponibilidad del N nativo del suelo.

Estos efectos, no identificados cuando se aplica el método de la diferencia, ocasionan una sobreestimación del Nddf y, por lo tanto, también una sobreestimación de la ERNF. Hart *et al.* (1986) y Harmsen y Moraghan (1988) consideraron que el método isotópico subestima el aporte de N del fertilizante, porque no toma en consideración las reacciones de intercambio entre el nitrógeno del suelo y el N del fertilizante y considera como aporte del suelo, a una parte de N proveniente indirectamente del fertilizante.

ERNF por el Método Isotópico

La variedad Méx 69-290 no presentó diferencias significativas en la ERNF como consecuencia de los efectos de fuentes, formas de aplicación, así como de su interacción fuentes por formas de aplicación. La ERNF media fue 8.3% y el CV 75%. A pesar del error experimental, obtenido en la determinación de esta variable, surge la interrogante de que si ¿es posible mejorar esta eficiencia o es ya una característica intrínseca del cultivo?, ya que en la mayoría de los trabajos realizados con ^{15}N en caña de azúcar las ERNF varían de 12 a 40%, no obstante, que el rendimiento de caña obtenido en esos estudios es excelente (Ruschel *et al.*, 1977; Rivera y Treto, 1989; Rivera *et al.*, 1991; Chapman *et al.*, 1994; Weier *et al.*, 1996). Cuando la ERNF se calculó con plantas de 6.5 meses de edad (Cuadro 5), el efecto de la época de aplicación del fertilizante fue significativo, lográndose un incremento de 7.4% en la ERNF al aplicar el fertilizante a los tres meses de edad de la planta, sobre la aplicación realizada al mes de edad; sin embargo, esta ERNF resultó inferior a la reportada por Chapman *et al.* (1994). Esta baja ERNF de 22.9% indica que de los 174.2 kg ha⁻¹ de N absorbidos por el cultivo de caña, 36.7 kg ha⁻¹ provinieron del fertilizante y 137.5 kg ha⁻¹ se extrajeron del suelo; se desconoce el destino de 123.3 kg de N de la dosis aplicada. Se especula que éstos entraron al reservorio de sustitución (Jenkinson *et al.*, 1985; Hart *et al.*, 1986), dado que los estudios de la dinámica del amonio y nitrato no indican que el proceso de lixiviación sea importante para el Vertisol, y que la volatilización del N se controla con la aplicación subsuperficial del fertilizante. Todo parece indicar que los procesos de inmovilización y desnitrificación son los responsables de la baja eficiencia de utilización del N fertilizante en la zona; de ahí la importancia de mejorar el drenaje de los suelos que contienen más de 30% de arcilla (Hart *et al.*, 1986; Weier *et al.*, 1996). Con relación a la determinación de ERNF en plantas de 10.5 meses de edad, se observó cierta tendencia de la aplicación a los tres meses, por superar a la realizada al mes de edad.

CONCLUSIONES

La ERNF en ambos suelos tendió consistentemente a ser superior cuando se aplicó sulfato de amonio, e inferior al aplicar nitrato de potasio; este comportamiento, aunado al costo elevado

de este fertilizante, lo descalifica como proveedor al suelo de nitrógeno para la caña de azúcar. El método isotópico detectó consistentemente valores de ERNF inferiores a los obtenidos por el método de la diferencia y al igual que éste, tampoco detectó significancia del efecto de fuentes de nitrógeno sobre la ERNF, la cual tuvo un valor promedio de 9.5%. A pesar de que los coeficientes de variación del método isotópico fueron menores que los del método de la diferencia, aquél no detectó significancia estadística entre formas o épocas de aplicación del fertilizante, pero las tendencias fueron iguales en ambos métodos. El método de la diferencia detectó que la aplicación enterrada del fertilizante superó en ERNF a la aplicación superficial en 27% en el Vertisol y en 15 % en el Inceptisol. La aplicación del fertilizante a los tres meses de edad superó en ERNF a la aplicación al mes, en 8.8% en el Vertisol y 23.6% en el Inceptisol. Los resultados obtenidos por el método isotópico indican que en el Vertisol, en promedio el nitrógeno derivado del fertilizante fue de 12.2 kg ha⁻¹ y que el suelo proporcionó 118.7 kg ha⁻¹ del contenido total de N en el cultivo de caña, presentándose el llamado ANIS aparente. Se observó que la ERNF por plantas de 6.5 meses de edad fue mayor que la evaluada a los 10.5 meses de edad, lo que sugiere que ocurrió un proceso de dilución en el contenido de ^{15}N . Por lo anterior, puede recomendarse que la fertilización de la caña de azúcar en las condiciones del estudio, debe realizarse a los tres meses de edad de la planta, enterrando el fertilizante, con lo que se elevará sustancialmente la eficiencia de recuperación del nitrógeno fertilizante.

AGRADECIMIENTOS

Al SIGOLFO, Fundación Produce Tabasco A.C. y GITCAÑA-Campus Tabasco, por el apoyo económico y las facilidades proporcionadas para realizar el presente trabajo.

LITERATURA CITADA

- Anderson, D.L. 1997. Comportamiento del nitrógeno en el suelo, amonificación, nitrificación y desnitrificación. Serie Nitrógeno. Sugar J. 5: 6-7.
- Bartholomew, W.V. y F.E. Clark. 1965. Soil nitrogen. p. 524. *In*: Series of Agronomy 10. American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Bowen, G.D. y E. Zapata. 1991. Efficiency in uptake and use of nitrogen by plants. pp. 349-362. *In*: Proceedings International

- Symposium on Use of Stable Isotopes in Plant Nutrition and Environmental Studies. IAEA-FAO. Viena, Austria.
- Chapman, L.S. y M.B.C. Hayson. 1991. Nitrogen fertilization for fields with sugar cane crop residues. *Proceedings Austr. Soc. Sugar Cane Technologists* 13: 53-58.
- Chapman, L.S., M.B.C. Hayson y P.G. Saffigna. 1994. The recovery of ^{15}N from labelled urea fertilizer in crop components of sugarcane and in soil profiles. *Aust. J. Agric. Res.* 45: 1177-1185.
- Etchevers B., J.D. 1988. Análisis químico de suelos y plantas. Notas del curso. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México.
- Frency, J.R., O.T. Denmead, A.W. Wood, P.G. Saffigna, L.S. Chapman y G.J. Ham. 1992. Factors controlling ammonia loss from trash covered sugar cane fields fertilized with urea. *Fertilizer Res.* 34: 341-349.
- García, E.A. 1984. Manual del campo cañero mexicano. Instituto para el Mejoramiento de la Producción de Azúcar. México, DF.
- GEPLACEA. Grupo de Países Latinoamericanos y del Caribe Exportadores de Azúcar. 1992. Manual de mecanización del campo cañero mexicano. GEPLACEA-CONACYT-CIATEQ. México, DF.
- Hageman, R.H. 1984. Ammonium versus nitrate nutrition of higher plants. pp. 67-85. *In: Nitrogen in crop production.* Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Harmsen, K. y J.T. Moraghan. 1988. A comparison of the isotope recovery and difference methods for determining nitrogen fertilizer efficiency. *Plant Soil* 105: 55-67.
- Hart, P.B.S., J.A. Royner y D.S. Jenkinson. 1986. Influence of pool substitution on the interpretation of fertilizer experiments with ^{15}N . *Soil Sci.* 87: 389-403.
- Hatch, D.J., S.C. Jarvis y R.J. Parkinson. 1998. Concurrent measurements of net mineralization, nitrification and leaching from field incubated soil cores. *Biol. Fertil. Soils* 26: 323-330.
- Jenkinson, D.S., R.H. Fox y J.H. Rayner. 1985. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen. The so called priming effect. *J. Soil Sci.* 36: 425-444.
- McMahon, G. 1995. Fertilising with stoolsplitters in the Burdekin. *BSES Bulletin, Australia* 51: 20-21.
- Rivera, R. y E. Treto. 1989. Influencia de la fertilización-N y el tipo de planta cultivada sobre la dinámica de las formas minerales del N en suelo ferralítico rojo compactado. *Cultivos Tropicales* 11: 71-79.
- Rivera, R., A. Velazco y E. Treto. 1991. La fertilización (15-N), nutrición nitrogenada y actividad de los microorganismos nitrificadores en la caña de azúcar, cepa de caña planta, cultivada sobre suelo ferralítico rojo. *Cultivos Tropicales* 12: 21-28.
- Ruschel, A.P., E. Matsui, J.F. Orlando y V.C. Bittencourt. 1977. Closed system nitrogen balance studies in sugarcane utilizing 15-N ammonium sulphate. *Proceedings XVI Congress of ISSCT. Sao Pablo, Brasil. Agronomy* 2: 1539-1547.
- Salgado G., S. 1995. Como incrementar los rendimientos de caña de azúcar en el estado de Tabasco. Campus Tabasco-ISPOTAB. Folleto para productores. H. Cárdenas, Tabasco.
- Salgado G., S., R. Nuñez E. y L. Bucio A. 1995. Fertilización NPK de la caña de azúcar en la Chontalpa, Tabasco. pp. 20-23. *In: Memorias de la VIII Reunión Científica Forestal y Agropecuaria de Tabasco.* Villahermosa, Tabasco.
- Salgado G., S., R. Nuñez E., J.J. Peña C., J.D. Etchevers B., D.J. Palma L. y M.R. Soto H. 1997. Dinámica de las formas amonio (NH_4^+) y nitrato (NO_3^-) en un Vertisol. pp. 18-24. *In: Memorias del VII Día del Cañero.* GITCAÑA, Campus Tabasco-Colegio de Postgraduados. H. Cárdenas, Tabasco.
- SAS. 1996. SAS/STAT Software: Changes and enhancements. Through release 6.11. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA.
- Sulroca, D.F. 1995. El ABC de los fertilizantes y su manejo en la caña de azúcar. *Cañaveral. Habana, Cuba* 1(2): 6-13.
- Weier, K.C., C.W. McEwan, I. Vallis, V.R. Catchoole y R.J. Myers. 1996. Potential for biological denitrification of fertilizer nitrogen in sugarcane soils. *Aust. J. Agric. Res.* 47: 67-79.
- Wetselaar, R. y G.D. Farquhar. 1980. Nitrogen losses from tops of plants. *Adv. Agron.* 33: 263-299.
- Zapata, F. 1990. Técnicas isotópicas en estudios sobre la fertilidad del suelo y la nutrición de las plantas, pp. 61-128. *In: G. Anderson (ed.) Empleo de técnicas nucleares en los estudios de relación suelo-planta.* Colección de cursos de capacitación No. 2. Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA). Viena, Austria.

ESTADO NUTRIMENTAL DEL LIMON MEXICANO EN SUELOS CALCIMORFICOS

Nutritional Status of Mexican Lime in Calcareous Soils

R. Maldonado T.¹, J.D. Etchevers B.², G. Alcántar G.², J. Rodríguez A.³ y M.T. Colinas L.³

RESUMEN

El rendimiento promedio del limón mexicano (*Citrus aurantifolia* Christm Swingle) en el valle de Apatzingán (Michoacán, México) es de 15 t ha⁻¹, pero algunos agricultores han logrado producir hasta 45 t ha⁻¹. Esta gran diferencia entre el rendimiento actual y el posible sugiere la existencia de problemas, posiblemente de carácter nutrimental, que deben ser investigados por la importancia económica y social que este cultivo tiene en esa región. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la fertilidad de los suelos cultivados con limón mexicano, estimar la extracción nutrimental por la cosecha y establecer intervalos de concentración e índices de balance Kenworthy, con el propósito de encontrar una explicación a los bajos rendimientos y proponer las medidas correctivas correspondientes. Se colectaron 150 muestras de suelo, 150 foliares y nueve muestras de fruto, durante los meses de junio a septiembre (1998) en el valle de Apatzingán. Los resultados de los análisis de suelo de la región permiten concluir que se trata de materiales que presentan características calcimórficas (> 1.0% de CaCO₃), pH alcalino (> 7.0), pobres en materia orgánica, con concentraciones de medias a bajas de N inorgánico y P, altas en K, Ca y Mg, y de bajas a muy bajas en Fe, Mn, Zn y Cu. La variable CaCO₃ total se relacionó de forma directa con el pH y ambos de manera inversa con N, Fe y Mn. Mientras que N y Cu mostraron una relación inversa con CaCO₃ activo, igual que el K respecto al pH y Fe con relación al K/Ca. Se calcularon los intervalos de concentración nutrimental en hojas de limón mexicano, que se compararon con los valores establecidos para cítricos (naranja principalmente). Las concentraciones de N, P, K, Fe, Mn, Zn, Cu y B,

observadas en la región, fueron similares a los estándares reportados para otras regiones del mundo, con excepción del Ca y Mg que fueron ligeramente superiores. Simultáneamente al levantamiento nutrimental se obtuvieron los índices de balance Kenworthy para este cultivo y se elaboró con ellos el diagnóstico nutrimental regional. El Mn, Zn, Fe y B fueron los más limitativos, mientras que el N, Ca, K, P y Mg se encontraron en adecuado balance. La situación deficitaria de la mayoría de los micronutrientes es explicable por la naturaleza calcárea de los suelos y confirma la hipótesis de que los bajos rendimientos se encuentran, en parte, ligados a esta situación. Con relación a la extracción nutrimental por el fruto, se obtuvo que el K fue el elemento mayormente extraído, seguido de N, Ca, P y Mg, mientras que los micronutrientes se extrajeron en orden de mayor a menor de la manera siguiente: Fe, B, Zn, Cu y Mn. Los resultados obtenidos en este estudio permitirán redefinir la forma de fertilización, para una mejor nutrición del limón mexicano, para que el manejo de esta variable redunde en mayores rendimientos y calidad del fruto cosechado.

Palabras clave: *Citrus aurantifolia*, *nutrición mineral*, *suelos alcalinos*, *carbonatos*.

SUMMARY

The average yield of Mexican lime (*Citrus aurantifolia* Christm Swingle) in Apatzingán Valley, Michoacán (Mexico) is 15 t ha⁻¹, but some farmers have been able to obtain up to 45 t ha⁻¹. This great difference between actual and possible yield suggests the existence of problems that should be investigated. The objective of this work was to evaluate the fertility of the soil cultivated with Mexican lime to estimate the nutrimental extraction by the fruit and to establish concentration intervals and Kenworthy balance indexes in order to explain the low yields and propose solutions. From June to September 1998, 150 soil samples, 150 leaf samples, and nine fruit samples were collected at random. The soils of the region are calcareous (> 1.0% CaCO₃), alkaline (pH > 7.0), poor

¹Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 56230 Chapingo, Edo. de México. (ranferim@taurus1.chapingo.mx)

²Instituto de Recursos Naturales, ³Instituto de Recursos Genéticos y Productividad, Colegio de Postgraduados. 56230 Montecillo, Edo. de México.

in organic matter, medium to low inorganic N and P, high contents of K, Ca and Mg, and low to very low Fe, Mn, Zn and Cu. The variable total CaCO_3 correlated directly with N, Fe and Mn, while N and Cu had an inverse relationship with active CaCO_3 . Inverse relationships between K and pH and between Fe and K/Ca were also revealed. The intervals of nutrient concentration were calculated in leaves of Mexican lime and compared with the established values for other citrus fruits (mainly oranges). The concentrations of N, P, K, Fe, Mn, Zn, B, and Cu observed in the region were similar to the standards reported by other authors, except for Ca and Mg, which were slightly higher. Together with the nutrient analysis, Kenworthy balance indexes were obtained and, with these, a regional nutrient diagnosis was carried out. Mn, Zn, Fe, and B were the most limiting elements, while N, Ca, K, P, and Mg were found in adequate balance. The deficient presence of most of the micronutrients can be explained by the calcareous soils, and the hypothesis that the low yields are partly related to this deficiency was confirmed. As to the extraction of nutrients by the fruit, it was found that K was the element that was most extracted, followed by N, Ca, P, and Mg. The micronutrients extracted, from most to least, were Fe, B, Zn, Cu, and Mn. The results obtained in this study will permit a redefinition of fertilization that will lead to better nutrition and thus higher yields and better quality of Mexican lime.

Index words: Citrus aurantifolia, mineral nutrition, alkaline soils, carbonates.

INTRODUCCION

Algunos de los factores más restrictivos de la producción de limón mexicano en el valle de Apatzingán son: el manejo deficiente del riego, la alta incidencia de gomosis, el inadecuado control de malezas y aspectos relacionados con el suelo (Davies y Albrigo, 1994; Chávez, 1996). Sobre el papel del suelo en este problema no se ha investigado mucho, pero se supone que características, como la presencia de carbonato de calcio libre y el pH alcalino, inciden negativamente en la disponibilidad, acceso, absorción, transporte y asimilación de varios nutrimentos por los limoneros (Sumner, 2000), ya que cuando esta especie crece en esa situación, muestra bajo rendimiento y mala calidad de fruta. A pesar de la importancia económica del cultivo de limón en México, la información sobre su fertilización es limitada y aun

más en suelos con presencia de CaCO_3 , donde según Obreza *et al.* (1998) se afecta la disponibilidad de N, P, K, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu. En estos suelos, el NH_4^+ puede transformarse a NH_3 , perdiéndose por volatilización (Tisdale *et al.*, 1993) o también rápidamente nitrificarse, formando NO_3^- (Obreza *et al.*, 1998) el cual puede lixivarse. Sin embargo, es común que para fertilizar los huertos de naranjo se recomiende aplicar 100 a 300 kg N ha^{-1} (Cohen, 1976) y aun dosis arriba de 360 kg en huertos muy productivos (Smith, 1966), que en las condiciones de suelos alcalinos referidos pudiesen significar pérdidas potenciales.

El P es importante en el metabolismo de los carbohidratos, grasas, proteínas y transporte de energía en la fotosíntesis, respiración y asimilación del N (Mengel y Kirkby, 1982; Boulton *et al.*, 1984), pero con frecuencia no se encuentra disponible en el suelo, especialmente donde existe alta concentración de CaCO_3 y pH alcalino. En esas condiciones precipita en forma de brushita ($\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y variseita ($\text{AlPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), principalmente (Tek *et al.*, 1994), lo cual origina que la dosis de aplicación de fertilizante fosfatado que se requiere aplicar a cada suelo sea diferente. Por ejemplo, Weir y Sarooshi (1991) recomendaron para limón, dosis de 0.91 kg de P_2O_5 árbol⁻¹ en suelos arcillosos; pero de 1.0 kg de P_2O_5 árbol⁻¹ en suelos arenosos.

La dosis de K empleada en cítricos varía, dependiendo de las características de los suelos y el rendimiento de los huertos. Por ejemplo, Weir y Sarooshi (1991) recomendaron dosis de 136 y 156 kg de K_2O ha^{-1} para huertos de limón, establecidos en suelos arcillosos y arenosos, respectivamente.

Para establecer racionalmente las necesidades nutrimentales de los huertos de cítricos y decidir acerca de los fertilizantes que deben aplicarse, es necesario conocer el estado nutrimental de los árboles. La idea de diagnosticar el estado nutrimental de los huertos con antelación a la aplicación de fertilizantes, es conocer las concentraciones de los elementos esenciales que pudiesen ser deficitarias y, por este hecho, limitar la posibilidad de alcanzar los rendimientos máximos posibles. Con dicha información es posible proceder con oportunidad a la corrección del problema. Existen numerosos métodos para el diagnóstico del estado nutrimental de los cultivos; algunos se basan en el análisis químico del tejido vegetal.

El análisis del tejido es un procedimiento especialmente sensible para detectar deficiencias y

toxicidad, las cuales se relacionan, por lo general, directamente con el rendimiento. Los criterios para la interpretación de los resultados de análisis foliares son numerosos; sin embargo, en el presente texto sólo se analizarán dos de ellos: los intervalos de concentración y los índices de balance.

Intervalos de concentración. Son valores de concentración de un nutrimento, generalmente medidos en las hojas de plantas sometidas a fertilización con dosis crecientes de un elemento, ya sea en cultivos sin suelo o directamente en huertos, que se relacionan empíricamente con el rendimiento o calidad de un producto de interés económico (Beyers, 1962; Kenworthy, 1967). El espacio de exploración de los valores de concentración (que abarcan valores muy bajos a muy altos) se dividen en intervalos o clases que se denominan: deficiente, bajo, óptimo o normal, alto y excesivo. Reuther y Smith (1954), Chapman (1966), Embleton *et al.* (1976), Netto *et al.* (1988), Malavolta *et al.* (1989) y el Grupo Paulista (1990, 1994) establecieron los intervalos de concentración para cítricos. Sin embargo, los más difundidos y empleados son los establecidos por Embleton *et al.* (1976) para naranjo, en California, los cuales se aplican a resultados de análisis practicados en hojas de cinco a siete meses de edad, colectadas en ramas sin fruto y del flujo de primavera. En contraste con los anteriores, los propuestos por Chapman (1966) se aplican a hojas de cuatro a siete meses de edad, del flujo de primavera y de ramas sin frutos. La precisa definición del órgano muestreado obedece a que las concentraciones en las hojas varían con la edad del órgano y con el hecho de existir en la rama sitios de demanda.

En el Cuadro 1 se muestra un resumen de intervalos de concentración óptimos, establecidos por diferentes investigadores.

Las concentraciones correspondientes a los diferentes intervalos propuestos por Netto *et al.* (1988), Malavolta *et al.* (1989) y el Grupo Paulista (1990, 1994) en Brasil, para naranjo, son ligeramente mayores para el caso del N, muy similares las de P y K, y menores las de Ca y Mg a los propuestos por Embleton *et al.* (1976), Chapman (1966) y Reuther y Smith (1954), en California. En cuanto a micronutrientes, los intervalos de Fe, Mn, Zn y Cu son similares en el valor inferior del óptimo, pero los intervalos de California presentan mayor amplitud respecto a los valores reportados para cítricos en Brasil. Mientras que en la concentración de B, el valor inferior del intervalo óptimo propuesto en California es menor y similar el valor superior, respecto a los intervalos establecidos para Brasil.

Es comprensible que existan ciertas variaciones en los intervalos de concentración propuestos para los cítricos, las que se atribuyen a las condiciones edáficas, ambientales e internas del cultivo en las que se generaron. También es claro que, para realizar un diagnóstico confiable, es necesario cumplir con las normas de muestreo que deben ser idénticas a las condiciones en las que se establecieron los intervalos de concentración (Prolaran, 1977).

Índices de Balance. Esta técnica, desarrollada por Kenworthy (1961), define el valor estándar como el valor igual a la media de la concentración nutrimental de hojas muestreadas en un estado particular, de árboles que tuviesen un desarrollo hortícola deseable. Para generar el estándar, se selecciona 10% o más de una población que exhiba un atributo deseado (por ejemplo, rendimientos elevados) y un coeficiente de variación (CV) menor que 34%. Kenworthy (1967) propuso que las concentraciones nutrimentales en una muestra se expresen como porcentaje del valor estándar y se ajusten mediante el

Cuadro 1. Intervalos de concentración nutrimental foliar óptimos propuestos para cítricos.

Elemento	A	B	C	D	E	F	G
N (%)	2.40-2.60	2.40-2.60	2.50-2.70	2.30-2.70	2.50-2.70	2.30-2.70	2.30-2.70
P (%)	0.12-0.16	0.12-0.16	0.12-0.16	0.12-0.16	0.12-0.16	0.12-0.16	0.12-0.16
K (%)	0.70-1.09	1.20-1.70	1.20-1.70	1.20-1.70	1.20-1.70	1.20-1.70	1.00-1.50
Ca (%)	3.00-5.50	3.00-5.50	3.00-4.50	3.00-4.50	3.00-4.90	3.00-4.50	3.50-4.50
Mg (%)	0.26-0.60	0.26-0.60	0.30-0.49	0.20-0.39	0.30-0.50	0.30-0.49	0.25-0.40
Fe (mg kg ⁻¹)	60-120	60-120	50-120	50-120	60-120	50-120	50-120
Mn (mg kg ⁻¹)	25-200	25-200	25-49	25-49	25-100	25-49	35-50
Zn (mg kg ⁻¹)	25-120	25-120	25-49	25-49	25-100	25-49	35-50
Cu (mg kg ⁻¹)	5-16	5-16	5-12	5.0-12.9	5-16	5.0-12.9	4.0-10
B (mg kg ⁻¹)	31-100	31-100	36-100	36-100	36-100	36-100	36-100

A) Embleton *et al.* (1973); B) Reuther *et al.* (1962); C) Smith (1966); D) Netto *et al.* (1988); E) Malavolta *et al.* (1989); F) Grupo Paulista (1990); G) Grupo Paulista (1994).

CV del estándar. Los resultados de concentraciones nutrimentales de árboles o huertos manejados mediante índices de balance uniformizan su valor y permiten hacer comparaciones más fáciles y objetivas entre los nutrimentos (Kenworthy, 1961). Según Sumner y Boswell (1981), este método lista los nutrimentos en un orden de requerimiento y evalúa el balance entre ellos, pero presenta algunas desventajas, como son: la interpretación se afecta por el tipo y la posición de hoja en la planta, los estándares nutrimentales deben obtenerse de una población homogénea para una etapa de crecimiento del cultivo, lo que obliga a diagnosticar sólo para el estado de crecimiento en el cual se obtuvo el estándar.

Con el propósito de evaluar la fertilidad de los suelos en el valle de Apatzingán y conocer el estado nutrimental de los árboles de limón mexicano, se plantearon los objetivos siguientes: identificar las clases de suelo en las que se cultiva limón mexicano en el valle de Apatzingán, Michoacán; evaluar la fertilidad actual de esos suelos para identificar las variables con mayor influencia en la nutrición; estimar la cantidad de nutrimentos extraídos por la cosecha; y, finalmente, establecer intervalos de concentración e índices de balance Kenworthy que permitirán en el futuro conocer más acertadamente el estado nutrimental de limón mexicano en la región de estudio y corregir los problemas.

MATERIALES Y METODOS

La investigación se desarrolló en tres fases: (1) obtención de muestras de suelo, foliares y de fruto en huertos del área de estudio, (2) análisis químico de las muestras colectadas y (3) análisis estadísticos e interpretativos de los resultados.

Se hizo un censo de las huertos de cítricos, ubicadas en el valle de Apatzingán, que se localizaron físicamente en un mapa, escala 1:50 000, preparado a partir de mapas edafológicos, topográficos, geológicos y de vegetación, de escala 1:250 000 y 1:50 000. Se identificaron 23 434 ha plantadas con limón mexicano. De esta población, se seleccionó, en función de los tipos de suelo, una muestra amplia de 150 huertos plantadas con la especie mencionada y se colectaron muestras de suelo entre julio y septiembre de 1998. La superficie de cada huerto se dividió en áreas homogéneas y se colectaron 25 submuestras, una por árbol a una profundidad de 0 a 30 cm, en la zona de mayor desarrollo radical de 25 árboles

elegidos al azar. Las muestras se secaron, se molieron y se les determinó pH, contenido de materia orgánica, N inorgánico, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu mediante los métodos descritos por Etchevers-Barra (1988). El CaCO_3 total se determinó por el método Horton y Newson (1953) y el CaCO_3 activo por el procedimiento de Dupuis (1969). Los resultados obtenidos se clasificaron por valores de referencia, establecidos por varios investigadores.

Para determinar los Intervalos de Concentración e Índices de Balance Kenworthy, se obtuvieron 150 muestras foliares en los mismos huertos y árboles donde se colectaron las muestras de suelo y se les censó el rendimiento en t ha^{-1} . Las muestras fueron hojas sanas, de cuatro a siete meses de edad, ubicadas en ramas sin fruto, en la quinta posición contando desde el ápice de la rama y orientadas en cada uno de los cuatro puntos cardinales. Las hojas se colocaron en bolsas de plástico en hieleras portátiles para su conservación y se trasladaron al laboratorio para su posterior preparación y análisis. Cada muestra se lavó de acuerdo con el procedimiento propuesto por Chapman (1960), se secó a 70°C durante 48 h en estufa con circulación de aire forzado y se molió a malla 20 en un molino de acero inoxidable (Etchevers-Barra, 1988). La digestión del material se realizó con una mezcla diácida ($\text{HNO}_3/\text{HClO}_4 = 4/2 \text{ mL}$). La concentración de P, K, Ca, Mg, Fe, Zn, Mn y Cu en el digerido se determinó en un espectrofotómetro de inyección de plasma. El N se digestó en mezcla ácida (H_2SO_4) y se evaluó mediante destilación por arrastre de vapor (Bremer, 1965), adaptado para análisis de plantas y modificado con ácido salicílico para incluir nitratos. Los resultados obtenidos se manejaron estadísticamente para separar 15% de la población de huertos con mayor rendimiento, 31 t ha^{-1} en promedio, cuya edad media fue de 10.8 años, los cuales se encontraban en su mayoría plantados a una distancia de $8 \times 8 \text{ m}$. Las concentraciones nutrimentales promedio, asociadas a esa población de rendimientos superiores, se utilizaron para obtener los Intervalos de Concentración, mediante el procedimiento propuesto por Leece (1975) y determinar los Índices de Balance mediante el método Kenworthy (1961). Con los Índices de Balance de Kenworthy, generados para la población de huertos de limón mexicano de la zona, que poseía 15% de rendimiento superior, se realizó el diagnóstico nutrimental regional por muestra y por promedio de las asociaciones de unidades de suelo más importantes.

Para el análisis de fruto se seleccionaron tres huertos con un rendimiento promedio de 25 t ha^{-1} , plantadas con $100 \text{ árboles ha}^{-1}$, de aspecto sano y vigoroso. De cada huerto se colectaron tres muestras de fruto (1 kg), haciendo un total de nueve muestras. Cada muestra se lavó con agua destilada, los frutos se cortaron en trozos de $2 \times 1 \text{ cm}$ evitando exprimir el jugo, se secó a 70 °C en estufa con circulación forzada de aire hasta peso constante, se molió para pasar a través de una malla número 20; se procesó y se analizó de manera similar a las muestras foliares.

Los resultados del análisis de suelo, tejido foliar y de fruto, se manejaron estadísticamente mediante el *Statistic Analysis System* y *Microsoft Office Excel*.

RESULTADOS Y DISCUSION

Evaluación de los Suelos y su Fertilidad

Los resultados del análisis químico de suelo (no se presentan *in extenso*) se agruparon en función de la clase de éstos (Cuadro 2). Todas las asociaciones se clasificaron como suelos calcimórficos por su contenido de CaCO_3 . La excepción la constituyó la asociación $\text{Vp} + \text{Ck} + \text{Hh}/3$ (ECSS, 1987). El pH de los suelos cultivados con limón mexicano en el valle de Apatzingán correspondió a las clases neutro a muy alcalino (Letelier, 1967), mientras que el valor de materia orgánica fue pobre en todos los suelos (Tavera, 1985).

Según Obreza *et al.* (1998), en suelos calcimórficos, la concentración de CaCO_3 y el pH alcalino afectan directamente la disponibilidad de N, P, K, Mg, Fe, Mn, Zn y Cu. En la región de estudio, la concentración de N inorgánico fue de muy baja a media (MAFF, 1979), la de P-Olsen de baja a alta (CSTPA, 1973), mientras que la de K intercambiable fue alta en todos los tipos de suelo (Etchevers *et al.*, 1971). La inconsistencia en los resultados, respecto a la disponibilidad de P y K, puede atribuirse a la forma de muestreo, ya que regionalmente se fertiliza con 1.65 kg de superfosfato de calcio triple y 1.25 kg de K_2SO_4 árbol⁻¹ año⁻¹, dividido en dos aplicaciones (Chávez, 1996), que se esparcen manualmente en el suelo en la proyección de la copa del árbol, creando cierta irregularidad en la distribución. Los puntos de muestreo no necesariamente coincidieron con los de fertilización. Las dosis de fertilización empleadas en la zona son suficientemente elevadas como para que haya

acumulación y ser la causa, especialmente, del alto nivel de K. Las concentraciones de Ca y Mg en todos los suelos fueron altos (Etchevers *et al.*, 1971), lo cual es congruente con la presencia de CaCO_3 .

El valor de la relación de concentraciones Mg/K intercambiables se consideró de óptimo a alto, mientras que el de Ca/K intercambiables resultó ser alto, con excepción del valor correspondiente al suelo Hc/2 (Ramírez, 1980), lo cual indica un alto valor de Ca y Mg en relación con K. La relación (Ca+Mg)/K intercambiables presentó valores óptimos en los suelos $\text{Vp} + \text{Hc}/3$ y Hc/2, mientras que en los demás ésta fue alta (Briceño y Carbajal, 1973; Ramírez, 1980), lo cual confirma un bajo valor de K respecto a Ca y Mg. Por último, la relación de Mg/Ca intercambiables en los suelos del valle indicaron relación de óptima a alta, con excepción del suelo Hc/2 la cual resultó baja (Ramírez, 1980). Un resultado que se juzga importante de este estudio, es la baja a muy baja concentración de los micronutrientos Fe, Zn y Mn (Ankerman, 1980), los cuales son propios de suelos alcalinos.

La baja concentración de Fe en los suelos alcalinos de esta región es explicada porque las formas Fe^{2+} y Fe^{3+} reaccionan formando productos de muy baja solubilidad como: ferrinidrita [$\text{Fe}(\text{OH})_3$] y goetita (FeOOH), principalmente (Loeppert *et al.*, 1984). La baja concentración de Zn se debe a que éste precipita formando compuestos amorfos de Zn, como son la smithsonita (ZnCO_3), la franklinita (ZnFe_2O_4), la willemita (Zn_2SiO_4) y la zincita (ZnO), todos insolubles (Lindsay, 1979). La concentración de Mn disminuye porque la forma manganosa (Mn^{2+}) es oxidada por los microorganismos a Mn^{3+} o Mn^{4+} al reducirse el O_2 para formar H_2O , generando de manera simultánea óxidos insolubles (MnO_2). Aunque, también, química y espontáneamente el Mn^{2+} se oxida en suelos alcalinos aireados y lo convierte de Mn soluble a hidróxidos (MnOOH), los cuales, a su vez, reaccionan con O_2 y forman MnO_2 (McBride, 1994).

A pesar de que los suelos de la región en estudio tienen pH alcalino, el Cu se encontró mayoritariamente en valores de medios a altos. Estas concentraciones se atribuyeron a las aplicaciones de pasta bordelés, que hacen los productores para el control de gomosis y oxiclورو de Cu para el control de hongos.

Cuadro 2. Variables químicas de las diferentes clases de suelo plantadas con limón mexicano, en el valle de Apatzingán.

Tipo de suelo ¹	Variable ²															
	CaCO ₃ %	pH	MO %	N	P	K mg kg ⁻¹	Ca	Mg	Mg/K	Ca/K	Ca/Mg	Ca+Mg/K	Fe	Cu	Zn	Mn
Vp/3	1.81 c	7.69 al	1.5 p	20 b	9 m	325 a	9915 a	1506 a	14.8 o	59.5 a	4.0 o	74.36 a	4.9 mb	2.6 a	0.5 mb	10.2 b
Vp + Hh/3	1.86 c	7.68 al	1.5 p	30 m	12 a	386 a	9640 a	1251 a	10.4 o	48.7 a	4.6 o	59.10 a	4.5 mb	2.7 a	0.7 mb	9.0 mb
Vp + Ck/3	1.29 c	7.41 al	1.6 p	17 b	7 m	399 a	11496	1387 a	11.1 o	56.2 a	5.0 o	67.34 a	5.4 mb	4.2 a	0.9 mb	14.1 b
Vp + Hc/3	1.27 c	7.66 al	1.9 p	18 b	18 a	466 a	7259 a	1620 a	11.1 o	30.4 a	2.7 o	41.53 a	8.5 mb	3.7 a	1.2 mb	14.6 b
Re + I + Hh/2	1.74 c	7.97 mal	1.1 p	8 mb	4 b	258 a	5684 a	667 a	8.3 o	43.0 a	5.1 a	51.26 a	4.1 mb	1.8 m	1.3 mb	7.7 mb
Vp + I + Hh/3	1.52 c	7.67 al	1.7 p	61 a	13 a	301 a	12196 a	1793 a	19.1 a	79.0 a	4.1 o	98.13 a	5.5 mb	2.0 m	1.0 mb	12.6 b
I + Vp/3	2.23 c	8.17 mal	1.3 p	7 m	6 m	242 a	5321 a	1211 a	16.0 a	42.9 a	2.6 o	58.94 a	5.5 mb	1.6 m	0.3 mb	7.7 mb
Vp + Re/3	1.26 c	7.84 mal	1.7 p	12 b	2 b	363 a	10369 a	821 a	7.2 o	55.7 a	7.6 a	62.96 a	2.5 mb	1.8 m	0.3 mb	7.0 mb
Hc/2	1.21 c	7.53 al	1.8 p	18 b	20 a	481 a	4173 a	1608 a	10.7 o	16.9 o	1.5 b	27.65 o	14.2 b	2.7 a	0.9 mb	18.9 b
Vp + Hh + I/3	1.31 c	7.81 mal	1.3 p	15 b	1 b	367 a	17997 a	2701 a	23.6 a	95.6 a	4.0 o	119.25 a	4.9 mb	1.4 b	0.2 mb	14.8 b
Vp + Ck + Hh/3	0.77nc	6.79 n	1.1 p	17 b	25 a	308 a	9312 a	1634 a	17.0 a	59.0 a	3.4 o	75.98 a	8.1 mb	2.2 m	0.4 mb	14.1 b
Xh + Vc/2	1.76 c	8.33 mal	0.5 p	15 b	1 b	110 b	2797 a	422 a	12.3 o	49.6 a	4.0 o	61.90 a	3.5 mb	0.5 mb	0.1 mb	4.1 mb

¹ Vp = Vertisol pélico; Vc = Vertisol crómico; Hh = Feozem háplico; He = Feozem crómico; Re = Regosol eútrico; I = Litosol; Ck = Chemozem cálcico; Xh = Xerosol háplico.

² 1 = textura gruesa; 2 = textura media; 3 = textura fina.

- c = calcimórfico; nc = no calcimórfico; al = alcalino; mal = muy alcalino; n = neutro; p = pobre; mb = muy bajo; b = bajo; m = medio; a = alto; o = óptimo.

Interacciones entre Variables del Suelo y de la Planta

La presencia de CaCO_3 en el suelo y en la solución del mismo favorece que el pH fluctúe entre 7.0 y 8.4, lo cual disminuye la disponibilidad y aprovechamiento de los nutrimentos (Russell, 1992). El exceso de CaCO_3 y el pH alcalino afectan la absorción, la distribución y la función de algunos nutrimentos. Las interacciones nutrimentales están asociadas con la absorción, adsorción, translocación y precipitación en algún sitio de la interfase suelo-raíz, lo cual puede afectar la absorción radical y la translocación nutrimental (Robson y Pitman, 1983; Sumner, 2000).

En el Cuadro 3, se presentan las regresiones más significativas entre CaCO_3 total con pH, Fe y Mn, y pH respecto a Fe, Mn y N, estimadas para los suelos de la región de estudio. Las ecuaciones muestran una relación directa entre pH y CaCO_3 e inversa de ambos respecto a N, Fe y Mn. La relación directa entre pH y CaCO_3 (calcita y aragonita) se debe a que, al disolverse, liberan CO_3^{2-} que, al reaccionar con el H_2O , generan OH^- que incrementan el pH (7.0 a 8.5) del suelo.

Según Rowell (1994), el pH del suelo varía con el tiempo dependiendo de la concentración de CO_3^{2-} , Ca^{2+} , de la solubilidad y fineza de la calcita, y por la presión parcial de CO_2 . Cuando los MgCO_3 son constituyentes importantes en los suelos calcimórficos, el pH del suelo puede llegar a ser de 9.0 (SRMCS-FAO, 1986), debido a que su solubilidad es hasta 120 veces mayor que la del CaCO_3 (McBride, 1994).

Como el pH del suelo depende de la concentración de CaCO_3 , la interacción de ambos sobre los nutrimentos se explica por las mismas causas. En el caso del Fe, aunque éste abunda en suelos calcimórficos, no es fácilmente aprovechable por las plantas ya que, según Loeppert *et al.* (1984), precipita como ferrinohidrita [$\text{Fe}(\text{OH})_3$] y goetita (FeOOH), lo cual explica su disminución al incrementarse la concentración de CaCO_3 y el pH.

La relación negativa del Zn con respecto al pH se explica en función de que en los suelos calcimórficos, el Zn^{2+} precipita y forma compuestos insolubles, lo cual disminuye la forma aprovechable en el suelo (Tisdale *et al.*, 1993). Según Lindsay (1979), la solubilidad del Zn decrece 100 veces por cada unidad de incremento del pH.

La asociación inversa entre pH y Mn se debe a la formación de precipitados (MnO_2) y al proceso oxidativo microbiano del Mn^{2+} , el cual es óptimo a pH 7.0 y se incrementa a pH alcalino, al igual que la proporción de Mn que se combina con ácidos húmicos y fúlvicos (Chattopadhyay, 1988; Russell, 1992), que disminuyen el Mn disponible.

La ecuación de regresión entre pH y N inorgánico indica un decremento en la concentración de estas formas de N al incrementarse el pH, lo cual resulta de la transformación parcial del NH_4^+ a NH_3 en suelos alcalinos y secos, originando pérdida de N por volatilización (Tisdale *et al.*, 1993). Aunado a lo anterior, según Obreza *et al.* (1998), la nitrificación biológica sería óptima entre pH 7.0 y 8.0, lo cual significa que debió ocurrir una transformación rápida de NH_4^+ a NO_3^- el cual pudo perderse por lixiviación.

Los resultados obtenidos en este estudio coinciden también con los reportados por Obreza *et al.* (1998), quienes establecieron que la disponibilidad de N, P, Mg, Fe, Mn y Zn para cítricos era baja en suelos calcimórficos, sobre todo cuando las concentraciones de CaCO_3 rebasan 3%.

En el Cuadro 4, se presentan las ecuaciones de regresión de algunas variables del suelo respecto a concentraciones nutrimentales foliares de la planta. Las regresiones más significativas fueron entre CaCO_3 activo y concentración foliar de N y Cu, pH del suelo con K intercambiable, y Fe foliar se relacionó con K/Ca foliares.

Dado que el pH tiene relación positiva con CaCO_3 total y CaCO_3 activo, la presencia de estos últimos se correlaciona, de manera inversa, con la concentración de N y Cu foliares. La pérdida de N al aumentar el CaCO_3 activo se explica por el efecto del

Cuadro 3. Interacciones de variables químicas del suelo y disponibilidad nutrimental.

Ecuación	R ²	B ₁	Ecuación	R ²	B ₁
pH = 7.457 + 0.147CaCO ₃ total	0.69	**	Fe = 27.44 - 2.89 pH	0.77	**
Fe = 6.529 - 0.750CaCO ₃ total	0.66	**	Mn = 69.75 - 7.72 pH	0.89	**
Mn = 13.257 - 1.571CaCO ₃ total	0.57	**	N = 95.78 - 9.67 pH	0.51	**

**Altamente significativo (P<0.01).

Cuadro 4. Interacciones de variables químicas del suelo y nutrientes absorbidos.

Ecuación	R ²	B ₁	Ecuación	R ²	B ₁
N = 95.78 - 9.67 CaCO ₃ activo	0.92	**	K = - 0.15 + 0.20 pH	0.88	**
Cu = 27.44 - 2.89 CaCO ₃ activo	0.58	**	K/Ca = 51.781 - 0.30 Fe	0.55	**

** Altamente significativo (P < 0.01).

carbonato en el pH que, a su vez, promueve la pérdida de N por volatilización y lixiviación, disminuyendo su acumulación en el suelo y su absorción por las plantas. El Cu también presenta alta dependencia del pH: por cada unidad de aumento de éste, su concentración disminuye 100 veces (Lindsay, 1979). Esta disminución se logra debido a que es químicamente adsorbido por las arcillas, materia orgánica y óxidos de Fe, Al y Mn, originando una concentración baja (10⁻⁸ M) de Cu²⁺ en la solución del suelo (Mortvedt *et al.*, 1972) y, en consecuencia, baja la absorción por los árboles de limón mexicano. Cuando el pH es alcalino, la adsorción de Cu aumenta por el incremento de las cargas pH-dependientes y la materia orgánica, así como por la disminución de la competencia con los H⁺ y un cambio en la hidrólisis del Cu (Lindsay, 1979).

La mayor absorción de K, al incrementarse el pH en el suelo, es una respuesta de la planta al pH alcalino y a la deficiencia de Fe (Belkhdja *et al.*, 1998), ya que incrementa la excreción de H⁺ mediante las ATPasas del plasmalema de las células de raíces, lo que favorece la absorción de K (Marschner, 1986).

Wallace y De Kock (1965) indicaron que, en las plantas que se desarrollan en pH alcalino y en condiciones de deficiencia de Fe, se bloquea la actividad de la enzima aconitasa, la cual regula la isomerización del ácido cítrico a isocítrico en el ciclo de Krebs, disminuyendo la síntesis de proteínas y promoviendo la acumulación de K⁺ libre. En estudios con portainjertos de cítricos, Hamzé (1983) encontró

que en plantas cloróticas, propias de suelos alcalinos, disminuía la síntesis de carbohidratos, lo cual inducía un lento movimiento del K⁺ en el floema de hojas, originando una inmovilización del K⁺ y una reducción en la producción de biomasa. Lo anterior conduce a que los tejidos foliares presenten una alta relación K/Ca conforme se incrementa la clorosis de Fe, según se puede observar en la ecuación (Cuadro 4) que relaciona, de manera inversa, ambas variables. Al respecto, Belkhdja *et al.* (1998), al estudiar las interacciones nutrimentales en hojas y flores de durazno deficientes en Fe, encontraron un incremento en la concentración de K y alta K/Ca, lo cual se atribuyó a un incremento en la excreción de H⁺ por las ATPasas del plasmalema de las células de raíces que favorece la absorción de K (Marschner, 1986) y a la acumulación de ácidos orgánicos (málico y cítrico), lo cual se presenta en órganos deficientes en Fe (Welkic y Miller, 1993).

Intervalos de Concentración

Con los resultados del análisis de nutrientes en las hojas al momento del muestreo, se determinaron intervalos de concentración para limón mexicano (Cuadro 5). Investigadores como Reuther y Smith (1954), Chapman (1966), Embleton *et al.* (1976), Netto *et al.* (1988) y Malavolta *et al.* (1989) reportaron valores de intervalos de concentración para cítricos, especialmente para hojas de naranjos en diferente edades y grados de fructificación.

Cuadro 5. Intervalos de concentración nutrimental para limón mexicano.

Nutriente	Deficiente	Bajo	Óptimo	Alto	Exceso
Nitrógeno (%)	< 1.81	1.82-2.49	2.50-3.17	3.18-3.85	>3.86
Fósforo (%)	< 0.09	0.10-0.17	0.18-0.25	0.26-0.29	>0.30
Potasio (%)	< 0.06	0.07-1.27	1.28-1.87	1.88-2.47	>2.48
Calcio (%)	< 1.71	1.72-3.72	3.73-5.73	5.74-7.74	>7.75
Magnesio (%)	< 0.10	0.11-0.36	0.37-0.62	0.63-0.88	>0.89
Hierro (mg kg ⁻¹)	< 30	31-60	61-115	116-170	>171
Manganeso (mg kg ⁻¹)	< 18	19-36	37-73	74-102	>103
Zinc (mg kg ⁻¹)	< 10	11-21	22-32	33-43	>44
Cobre (mg kg ⁻¹)	< 4.2	4.3-8.4	8.5-14.5	14.6-20.6	>20.7
Boro (mg kg ⁻¹)	< 25	26-50	51-77	78-104	>105

Los intervalos de concentración nutrimental, encontrados en hojas del limón mexicano, se compararon con los propuestos: por Netto *et al.* (1988) para hojas de naranja, de seis meses de edad provenientes de ramas con frutos; por Cohen (1976) para hojas de naranja de cuatro a siete meses de edad de ramas sin fruto; por Smith (1966) para hojas de naranja de cuatro a siete meses de edad, de ramas sin fruto y del ciclo de crecimiento de primavera; por Weir y Sarooshi (1991) para cítricos en general, obtenidos de hojas de cuatro a seis meses de edad y de ramas sin fruto; y por Embleton *et al.* (1976) para hojas de naranja Valencia y Navel, de cinco a siete meses de edad y de ramas sin frutos y sin flores.

Los intervalos de concentración obtenidos para limón mexicano del valle de Apatzingán fueron similares a los reportados por los antes mencionados autores en cuanto a K, Fe, Mn, Zn y Cu, pero en el caso del N, P, Ca y el Mg fueron mayores en el presente estudio. Lo anterior se atribuyó a la naturaleza calcimórfica de los suelos en esta región, donde se cultiva el limón mexicano.

Las concentraciones de Ca y Mg intercambiables en el suelo (Cuadro 2) fueron muy altas y, en consecuencia, también lo fueron las concentraciones en los tejidos del cultivo en estudio.

Indices de Balance Kenworthy

Los Indices de Balance Kenworthy para limón mexicano obtenidos en este estudio se presentan en el Cuadro 6.

No existen reportes de índices de balance para limón mexicano en México, por lo que éstos serían los primeros. Estos índices pueden utilizarse para diagnosticar el estado nutrimental de esta especie en el valle de Apatzingán y en huertos que se desarrollen en condiciones similares de suelo y clima, con potenciales de rendimiento similares. El órgano de referencia son hojas de cuatro a siete meses de edad, colectadas durante los meses de julio a septiembre, correspondientes a la quinta posición en la rama (contando desde el ápice) y en ramas ubicadas en la parte media del árbol. Su extrapolación a otras

condiciones debe hacerse con las reservas del caso y, en particular, considerar que los mencionados estándares se establecieron para rendimientos de aproximadamente 31 t ha⁻¹.

Diagnóstico del Estado Nutrimental de Limón Mexicano

Con los índices de balance obtenidos, se realizó el diagnóstico de las muestras foliares. El resultado porcentual se presenta en el Cuadro 7.

El diagnóstico mediante el orden de requerimiento nutrimental (ORN) indicó, en primer lugar, que un porcentaje importante de los huertos de limón mexicano del valle de Apatzingán presenta algún grado de insuficiencia nutrimental. Entre estos problemas más significativos destaca la situación de los micronutrientes Mn, Zn, Fe y B que resultaron ser los elementos más requeridos por este cultivo, con concentraciones 79, 66, 64 y 60%, respectivamente, abajo del valor normal. Sin ninguna duda, esta situación afecta la obtención de los rendimientos máximos posibles que pueden alcanzarse en estos huertos. Los resultados de concentración nutrimental fueron congruentes con la disponibilidad de esos elementos en el suelo; mientras que las concentraciones de Mg, P, Cu y K resultaron debajo de lo normal en 46, 41, 41 y 34% de las huertos, lo que también afectó los rendimientos.

Aunque la concentración de Mg fue abundante en estos suelos, la proporción de huertos con valores abajo del normal en el follaje fue alta, debido con toda probabilidad al efecto antagónico con Ca y al sinergismo que promueve la deficiencia de Fe sobre el K. El N y Ca se encontraron abajo de la concentración normal y deficiente en 25 y 26%, respectivamente, de las huertos analizadas, además éstos fueron los más balanceados en 71 y 66% de los huertos, seguidos por K, P, Mg y Cu.

Los resultados anteriores indican que los nutrimentos que más limitan el crecimiento, la producción y la calidad de la fruta de limón fueron Mn, Zn, Fe y B, por lo que es prioritaria su aplicación.

Cuadro 6. Estándares Kenworthy establecidos para el limón mexicano que se cultiva en el valle de Apatzingán, Michoacán, México.

Nutrimento	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn	Cu	B
	%			mg kg ⁻¹						
Media	2.8	0.21	1.57	4.72	0.49	88	55	27	11.5	64
CV	18.9	22.4	23.2	30.2	35.6	46.5	40.1	25.7	36.2	27.5

Cuadro 7. Proporción de huertos en las categorías de clasificación por Índices de Balance Kenworthy.

Nutriemento	Deficiente	Abajo del normal	Normal	Arriba del normal	Excesivo
Nitrógeno		25.1	70.9	4.0	
Fósforo		41.1	53.6	2.0	3.3
Potasio	1.3	32.5	55.6	8.6	2.0
Calcio		26.5	65.6	7.9	
Magnesio		45.7	51.0	3.3	
Hierro		63.5	29.8	6.0	0.7
Manganeso	7.9	70.9	16.6	3.3	1.3
Zinc	2.6	63.6	22.5	6.0	5.3
Cobre	1.3	39.7	51.0	2.0	6.0
Boro	13.3	46.4	32.5	3.3	4.5
ORN	Mn>Zn>Fe>B>Mg>P>Cu>K>Ca>N				

ORN = orden de requerimiento nutrimental.

Sin embargo, los mismos resultados señalan que es preciso reformar toda la práctica de la fertilización, ya que existen desbalances graves en la mayoría de los huertos de la región, provocados por la manera empírica en que se ha venido haciendo la práctica de la fertilización, sin considerar las particularidades del suelo de la región.

Extracción Nutrimental por el Fruto

Las cantidades de nutrimentos extraídos por el fruto de limón mexicano se presentan en el Cuadro 8.

El fruto del limón mexicano extrajo más K que cualquier otro de los nutrimentos esenciales, seguido de N, Ca, P y Mg. Este orden fue similar al orden de balance nutrimental. Al respecto, Koo (1984) indicó que K es el más abundante de los nutrimentos en el jugo de los cítricos, ya que tiene relación con el grado de acidez, la concentración de vitamina C y el tamaño del fruto. Cuando el nivel de K en los cítricos es deficiente, aumenta la relación de sólidos solubles y la acidez (Cohen, 1976).

Al comparar las extracciones nutrimentales de los frutos de limón mexicano con las de frutos de naranja, mandarina, lima y toronja, reportadas por Koo (1984), en cuanto a micronutrimentos, el orden de extracción de mayor a menor fue Fe, Zn, Cu y Mn. Aunque los valores de extracción de los cítricos son modificados por diferentes factores, existe similitud entre las cantidades y orden de extracción (K, N, Ca, P y Mg)

por el fruto de limón mexicano con los valores reportados por Chapman (1968), Marchal y Lacoéville (1969), Koo (1984) y Malavolta y Netto (1989). Es importante señalar que, en el caso de los cítricos, las cantidades de N y K absorbidos se incrementan de manera continua y constante hasta el periodo de maduración, lo cual indica que estos nutrimentos son requeridos durante todo el periodo de crecimiento del fruto. El P y el Mg son requeridos en mayor proporción durante el primer periodo de crecimiento del fruto, siendo luego constante su concentración hasta la maduración. El Ca, por su parte, es requerido durante la primera etapa y la tercera etapa de crecimiento del fruto, es decir, durante la etapa de formación del fruto ("cerillo") y en la formación de las semillas y madurez fisiológica (Cohen, 1976).

Los micronutrimentos, aunque se encuentran en menor cantidad, son de fundamental importancia en el metabolismo vegetal y le confieren mayor calidad al fruto en la cosecha. Al respecto, el fruto de limón mexicano extrajo en mayor medida Fe seguido de B, Zn, Cu y Mn, mientras que los cítricos en general presentan el orden de extracción siguiente: Fe, Zn, Mn y Cu (Chapman, 1968; Koo, 1984; Malavolta *et al.* 1989). Mientras que diversos autores reportan al Mn en tercer lugar de mayor extracción de los micronutrimentos, en limón mexicano ocupó el último lugar debido, quizás, a que este nutrimento se diagnosticó como el más limitativo en los huertos de la región (Cuadro 7).

Cuadro 8. Nutrimentos extraídos por tonelada de fruta fresca producida en un suelo calcimórfico.

Cítrico	kg					g				
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	Fe	Mn	Zn	Cu	B
Limón mexicano	1.86	0.662	2.728	1.169	0.164	3.41	1.31	1.74	1.44	3.30

CONCLUSIONES

Los suelos de la región presentan características calcimórficas ($> 1.0\%$ de CaCO_3), pH alcalino (> 7.0), pobres en materia orgánica, de medios a bajos en N inorgánicos y P, altos en K, Ca y Mg, y bajos en Fe, Mn, Zn y Cu, características que afectan su fertilidad y la nutrición del limón mexicano.

Al analizar estadísticamente la asociación de variables químicas del suelo, entre sí y con nutrimentos en la planta, se obtuvo que el CaCO_3 total se relaciona de forma directa con el pH y ambos, de manera inversa, con N, Fe y Mn, mientras que N y Cu mostraron una relación inversa con CaCO_3 activo, igual que el K respecto al pH y Fe con la relación K/Ca. Lo anterior indica que a mayor concentración de CaCO_3 total mayor alcalinidad y CaCO_3 activo en el suelo y menor disponibilidad de N, Fe, Mn y Cu; mientras que a mayor alcalinidad menor absorción de Fe y mayor absorción de K, lo cual incrementa la relación K/Ca en el follaje.

Se establecieron los intervalos de concentración para limón mexicano para hojas colectadas entre julio y septiembre, ubicadas en la quinta posición de ramas sin fruto, los cuales, al ser comparados con valores establecidos para cítricos (naranja principalmente), resultaron similares en cuanto a N, P, K, Fe, Mn, Zn, B y Cu, y ligeramente superiores en Ca y Mg.

Se obtuvieron los Índices de Balance Kenworthy para limón mexicano, no estimados anteriormente en México, y con ellos se elaboró el diagnóstico nutrimental regional, encontrándose Mn, Zn, Fe y B, como los nutrimentos más limitativos, mientras que N, Ca, K, P y Mg fueron los más balanceados en los árboles de limón mexicano. Sin embargo, puede asegurarse, que los bajos rendimientos promedio (15 t ha^{-1}) de limón mexicano se deben al desbalance nutrimental que presentan la mayoría de los huertos en el valle de Apatzingán.

En cuanto a los nutrimentos removidos por el fruto, se encontró que el K es extraído en mayor cantidad, seguido de N, Ca, P y Mg, mientras que el orden de extracción de los micronutrimentos fue Fe, B, Zn, Cu y Mn.

LITERATURA CITADA

- Ankerman, R.L. 1980. Soil and plant analysis. Agricultural Laboratories. Memphis, Tenn., USA.
- Belkhdja, R., F. Morales, M. Sanz, A. Abadía y J. Abadía. 1998. Iron deficiency in peach trees: Effects on leaf chlorophyll and nutrient concentration in flowers and leaves. *Plant Soil* 203: 257-268.
- Beyers, E. 1962. Diagnostic leaf analysis for deciduous fruit. *S. Afric. Soc. Agric. Sci.* 5: 315-329.
- Boult, C., E.J. Hewitt y P. Needham. 1984. Diagnosis of mineral disorders in plants. Vol. 1. Principles. Chemical Publishing. New York.
- Bremer, J.M. 1965. Total nitrogen. pp. 1135-1147. In: C.A. Black (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2. Agronomy 9.* American Society of Agronomy. Madison, WI.
- Briceño, J.A. y J.F. Carbajal. 1973. El equilibrio entre los metales alcalinos y alcalinotérreos en el suelo asociado con la respuesta del café a potasio. *Turrialba* 23: 56-71.
- Chapman, H. 1960. Leaf and soil analysis in citrus orchards. Manual 25. Agricultural Experimental Station, University of California. Berkeley, CA.
- Chapman, H.D. 1966. Analysis of orange leaves for diagnosing nutrient status reference to potassium. *Hilgardia* 19: 501-540.
- Chapman, H.D. 1968. The mineral nutrition of citrus. pp. 127-289. In: W. Reuther, L.D. Batchelor y H.J. Webber (eds.). *The citrus industry.* Agricultural Experimental Station. Division of Agricultural Sciences, University of California. Berkeley, CA.
- Chattopadhyay, N.C. 1988. Mineral elements in plant nutrition. pp. 1-54. In: T.K. Bose, S.K. Mitra y M.K. Sadhu (eds.). *Mineral nutrition of fruit crops.* Naya Prokash. Calcutta Six, India.
- Chávez C., X. 1996. Manual para producir limón en el valle de Apatzingán, Michoacán. Agenda Técnica 3. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Parícut, Michoacán, México.
- Cohen, A. 1976. Citrus fertilization. International Potash Institute. Bern, Switzerland.
- CSTPA. Council on Soil Testing and Plant Analysis. 1973. Handbook on reference methods for soil testing. Athens, GA.
- Davies, F.S y L.G. Albrigo. 1994. Citrus. Crop Production Science in Horticulture. CAB-International. Miami, FL.
- Dupuis, M. 1969. Dosage des carbonates dans les fractions granulométriques de quelques sols calcaires et dolomitiques. *Ann Agron.* 20: 61-88.
- ECSS. Expert Committee on Soil Survey. 1987. The Canadian system of soil classification. 2nd ed. Agriculture Canada Publication. Ottawa, Canada.
- Embleton, T.W., W.W. Jones, C.K. Labonaukas y W. Reuther. 1973. Leaf analysis as a diagnostic tool and guide to fertilization. pp. 183-210. In: W. Reuther, L.D. Batchelor y H.J. Webber (eds.). *The citrus industry.* Division of Agricultural Sciences, University of California. Berkeley, CA.
- Embleton, T.W., W.W. Jones y R.G. Platt. 1976. Leaf analysis as a diagnostic tool and guide to fertilization. pp. 4-9. In: H.M. Reisenauer (ed.). *Soil and plant-tissue testing in California.* Division of Agricultural Science, University of California. Berkeley, CA.
- Etchevers-Barra, J.D. 1988. Manual de métodos de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes. Centro de Edafología, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Etchevers-Barra, J.D., W. Espinoza y E. Riquelme. 1971. Manual de fertilidad y fertilizantes. 2a ed. Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción. Chillan, Chile.

- Grupo Paulista de Adubacao e Calagem para Citros. 1990. Recomendacoes de adubacao e calagem para citros no Estado de Sao Paulo. 1a ed. Laranja Cordeiropolis 11(3): 1-14.
- Grupo Paulista de Adubacao e Calagem para Citros. 1994. Recomendacoes de adubacao e calagem para citros no Estado de Sao Paulo. ed. especial. Laranja Cordeiropolis.
- Hamzé, M. 1983. Recherches sur la nutrition et la chlorose des agrumes en sols calcaires. Thèse Doctorat d'Etat Es-Sciences, Université de Montpellier. Montpellier, France.
- Horton, J.H. y D.W. Newson. 1953. A rapid gas evolution for calcium carbonate equivalent in liming materials. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 17: 414-415.
- Kenworthy, A.L. 1961. Interpreting the balance of nutrient element in leaves of fruit trees. pp. 28-43. *In:* W. Reuther (ed.). *Plant analysis and fertilizer problems*. Publication 8. American Institute of Biological Science. Washington, DC
- Kenworthy, A.L. 1967. Plant analysis and interpretation of analysis for horticulture crops. pp. 59-76. *In:* Soil testing and plant analysis. Part II. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Koo, R.C.J. 1984. Recommended fertilizers and nutritional sprays for citrus. Bulletin 536D. Agricultural Experimental Station, University of Florida. Gainesville, FL.
- Leece, D.R. 1975. Diagnostic leaf analysis for stone fruit. 4 Plum. *Austr. J. Exp. Agric. Anim. Husbandry* 15: 112.
- Letelier, A.E. 1967. Manual de fertilizantes para Chile. Banco del Estado. Santiago, Chile.
- Lindsay, W.L. 1979. Chemical equilibria in soils. Wiley. New York.
- Loeppert, R.H., L.R. Hossner y P.K. Amin. 1984. Formation of ferric oxihydroxides from ferrous perchlorates in stirred calcareous systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 677-683.
- MAFF. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. 1979. Fertilizer recommendation for agricultural and horticultural crops. Majesty's Stationery Office. London.
- Malavolta, E., G.C. Vitti y S.A. Oliveira. 1989. Avaliacao do estado nutricional das plantas: Principios e aplicacoes. Associacao Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Piracicaba, Brazil.
- Malavolta, E. y A.V. Netto. 1989. Nutricao mineral, calagem, gessagem e adubacao dos citros. Associacao Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. Piracicaba, Brazil.
- Marchal, J. y J.J. Lacoeyville. 1969. Bilan mineral du mandarinier. *Fruits*, Paris 24(6): 199-218.
- Marschner, H. 1986. Mineral nutrition in higher plants. Academic Press. New York.
- McBride, M.B. 1994. Environment chemistry of soils. Oxford University Press. New York.
- Mengel, K. y E. Kirkby. 1982. Principles of plant nutrition. 3rd ed. International Potash Institute. Bern, Switzerland.
- Mortvedt, J.J., P.M. Giordano y W.L. Lindsay. 1972. Micronutrients in agriculture. Soil Science Society of America. Madison, WI.
- Netto, A.V., B.V. Raj, E.E.A. Blasco, E. Malavolta, G.C. Vitti, H. Cantarella, T.J. Sabrino, J.A. Quaggio, H.D. Negri, O. Rodrigues y O.C. Bataglia. 1988. Recomendacoes de adubacao e calagem para citros no estado de Sao Paulo. Laranja. Cardeiropolis. 3(9): 1-15.
- Obreza, A.T., A.K. Ashok y D.V. Calvert. 1998. Citrus fertilizer management on calcareous soils. Document-CH086. University of Florida. Gainesville, FL. <http://cdis.ifas.ufl.edu/scripts/htmlgem.exe?body>
- Prolaran, J.C. 1977. Los agrios. Colección Agricultura Tropical. Blume. Barcelona, España.
- Ramírez, G. 1980. Análisis químico del suelo como guía para fertilización del cafeto. *Noticiero del Café*, Costa Rica 6 (187), 1-4.
- Reuther, W. y P. Smith. 1954. Leaf analysis as a guide to the nutritional status of orchard tree. pp. 166-180. *In:* P. Prevot (ed.). *Plant analysis and fertilizers problems*. Institut des Recherches pour les Huiles et Oléagineux. Paris.
- Reuther, W., W.W. Jones, T.W. Embleton y C.K. Labanauskas. 1962. Leaf analysis as guide to orange nutrition. *Better Crops with Plant Food*. Special issue 66: 44-69.
- Robson, A.D. y M.G. Pitman. 1983. Interactions between nutrient higher plants. pp. 147-180. *In:* A. Lauchli y R.L. Bielski (eds.). *Encyclopedia of plant physiology*. Springer Verlag. Berlin, Germany.
- Rowell, D.L. 1994. Soil science: Methods and applications. Wiley-Longman. New York.
- Russell, E.W. 1992. Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Smith, P.F. 1966. Citrus nutrition. pp. 174-207. *In:* N.F. Childers (ed.). *Nutrition of fruit crops*. Horticultural Publication. New Jersey.
- SRMCS-FAO 1986. Soil survey investigations for irrigation. Soils Bulletin 42. Roma.
- Sumner, M. 2000. Handbook of soil science. CRC Press. Washington, DC.
- Sumner, M.E. y F.C. Boswell. 1981. Alleviating nutrient stress. pp. 99-137. *In:* G.F. Arking y H.M. Taylor. (eds.). *Modifying the root environment to reduce crops stress*. Am. Soc. Agr. Eng. Monograph 4.
- Tavera S., G. 1985. Criterios para la interpretación y aprovechamiento de los reportes de laboratorio para las áreas de asistencia técnica. Publicación 3. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Delegación La Laguna, Coahuila, Mexico.
- Tek, C., N.K. Tomar y A.V. Shanwal. 1994. Reaction products of monocalcium in alkaline-calcareous and acid soils. *J. Indian Soc. Soil Sci.* 42: 539-542.
- Tisdale, L.S., W.L. Nelson, J.D. Beaton y J.L. Havlin. 1993. Soil fertility and fertilizers. MacMillan. New York.
- Wallace, A. y P.C. de Kock. 1965. Translocation of iron in plants. pp. 323-327. *In:* Symposium on Use of Isotopes and Radiation in Soil. Plant Nutrition Studies. IAEA, Vienna.
- Weir, R.G. y R. Sarooshi. 1991. Citrus nutrition. A NSW Agriculture and Fisheries No. H2.3.11. Jenni Millar. Division of Agricultural Services. New South Wales, USA.
- Welkie, G.W. y G.W. Miller. 1993. Plant iron uptake physiology by nonsiderophore systems. pp. 345-370. *In:* LL Barton y L Hemming (eds.). *Iron chelation in plants and soil microorganisms*. Academic Press. New York.

CONSECUENCIA DE LA FERTILIZACION NITROGENADA Y FOSFORICA SOBRE LA PRODUCCION DE AVENA IRRIGADA CON AGUA RESIDUAL

Consequence of Nitrogen and Phosphorous Fertilization on Production of Oats Irrigated with Waste Water

Jesús P. Amado Alvarez¹ y Pedro Ortiz Franco¹

RESUMEN

De febrero a junio 1992, se desarrolló un trabajo de campo establecido en un lote aledaño a la Laguna de Bustillos, sobre una superficie de 0.4 ha, donde el suelo es de textura arenosa, pobre en materia orgánica y libre de sales. El agua se obtuvo directamente de la Laguna para aplicar siete riegos, usando aspersión. Con el propósito de encontrar la mejor alternativa para cultivar avena, se incluyeron cuatro niveles de fertilización nitrogenada (0, 80, 160 y 240 kg ha⁻¹) y cuatro de fosfatada (0, 40, 80 y 120 kg ha⁻¹); se seleccionaron ocho tratamientos combinados bajo la Matriz Plan Puebla I, para dos factores. Adicionalmente, se incluyó un tratamiento con 100 kg ha⁻¹ de potasio y un testigo absoluto (sin fertilizante). Para detectar la posible contaminación por el uso del agua, se realizaron análisis de suelo, de la calidad del agua de riego y de elementos pesados en agua, suelo, planta y grano de avena. Con base en los resultados obtenidos, se puede afirmar que se alcanzó el objetivo planteado, produciendo avena libre de elementos pesados, consignando rendimientos máximos de 2245 kg ha⁻¹ de avena en grano. La mejor alternativa económica de producción fue cuando se usaron fertilizantes químicos en dosis de 80-0-0, la cual mostró beneficios de 1945 kg ha⁻¹, generando incrementos en utilidad neta de \$801 000.00. Por otro lado, se encontró que el agua de riego cambió de calidad durante el desarrollo del cultivo, teniendo una clasificación de C₃ S₁ al inicio, hasta C₃ S₄, en un tiempo de cuatro meses. Se aplicaron siete riegos, que sumaron una lámina de riego bruta de 36.3 cm. El análisis de suelo indicó que se trabajó en un suelo pobre en fertilidad y libre de sales. En cuanto a la presencia de elementos pesados (Pb, Cd, Ni, Co y Cr) en el agua de riego, suelo y grano de avena, se detectó que no hay problemas de contaminación.

¹ Campo Experimental Sierra de Chihuahua CIRNOC-INIFAP-SAGAR, Apartado Postal 554, Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua. (ortizfp@infosel.net.mx)

Recibido: Septiembre de 1996. Aceptado: Mayo de 2001.
Publicado en Terra 19: 175-182.

Palabras clave: Cuenca hidrológica, aguas negras, elementos pesados, producción de grano, irrigación.

SUMMARY

From February to June, 1992, an experiment was conducted with oats on a 0.4-ha plot on the shore of Bustillos Lake, in the *Ejido* Favela. The soil was sandy, poor in organic matter and salt free. The plot was irrigated with sprinklers seven times with water obtained directly from the lake. To find the best methods for oat production, four fertilizer rates were included: 0, 80, 160, and 240 kg N ha⁻¹; 0, 40, 80, and 120 kg P ha⁻¹. The eight combined treatments were selected from the Plan Puebla I matrix, for two factors. Also, 100 kg K ha⁻¹ and a control plot without fertilizer were included. Soil, irrigation water, and oat plants and grain were analyzed for water quality and to detect heavy metals. The results indicate that the goal of producing oats free of heavy metals was achieved, with grain yields of up to 2245 kg ha⁻¹. The best economic alternative for production was with the fertilizer rate of 80-0-0 with which yield was 1945 kg ha⁻¹, generating a net profit of 801 000.00 pesos ha⁻¹. Water quality changed from C₃ S₁ at the beginning of treatments to C₃ S₄ at the end of four months. Irrigation was applied seven times with a total application depth of 36.3 cm of water. Soil analyses indicated that the soil was low in fertility and salt-free. Irrigation water, soil and grain were not contaminated with Pb, Cd, Ni, Co, or Cr.

Index words: Watershed, sewage effluents, heavy metals, grain production, irrigation.

INTRODUCCION

En dos de cada 10 años, las poblaciones aledañas a la Laguna de Bustillos, en el municipio de Cuauhtémoc, Chihuahua, México, resultan inundadas por la ocurrencia de lluvias que exceden la precipitación pluvial media anual de la región (508 mm, al 50% de probabilidad). La Cuenca

Hidrológica No. 34, tiene una extensión de 3277 km², donde la depresión natural más pronunciada es la Laguna de Bustillos, con un área de 200 km², longitud promedio de 16.5 km, ancho de 7.5 km, profundidad media de 1.2 m y una capacidad aproximada de 148 millones de m³ de agua.

En la citada laguna, se captan los escurrimientos superficiales de 13 arroyos, los cuales van acompañados de sedimentos, producto de la erosión, debido a la deforestación, sobrepastoreo y cambios en el patrón de cultivos, las descargas de aguas negras de las ciudades de Cuauhtémoc y Anáhuac, Chih., y los desechos industriales de Pondercel de Chihuahua. Con esto se agrava el problema, puesto que la calidad del agua no es muy buena, además de que los poblados aledaños se encontraban inundados, existía la incertidumbre de qué hacer con estas aguas, considerando dentro de otros factores limitativos, la presencia de heladas de enero a abril y de octubre a diciembre (-2.7, -1.3, 0.5, 3.6 y -4.3, -0.2, -2.1, respectivamente).

Para presentar alternativas de solución sobre el problema citado, Amado *et al.* (1991a) hicieron el primer estudio sobre la calidad del agua, la que fluctuaba de C₃ S₃ a C₃ S₄, mientras que la calidad del suelo con fines agrícolas ofrecía un buen potencial.

Posteriormente, Amado *et al.* (1993) hicieron un trabajo sobre germinación y emergencia de 27 especies bajo invernadero, con suelo y agua de la Laguna de Bustillos, suelo aledaño a esta depresión, agua filtrada y agua potable. Los resultados indicaron que las semillas de sorgo, maíz, calabaza, avena y trigo, regadas con agua de la Laguna y en suelo de la misma, mostraron de 78 a 96% de emergencia. Estos reportes alimentaron el interés de establecer pruebas de campo en donde se utilizara el agua de la Laguna de Bustillos. Como el cultivo de la avena en esta región reviste una gran importancia, ya que el grano se utiliza para alimentos industriales y concentrados de dietas alimenticias para animales. Así mismo, la producción de forraje de este cultivo se emplea en la alimentación de ganado en el noroeste de Chihuahua. Con estos antecedentes, se planteó un trabajo, donde el principal objetivo fue determinar en campo la factibilidad de usar el agua de la Laguna de Bustillos para producir grano y forraje de avena con buena calidad.

REVISION DE LITERATURA

La avena ocupa el sexto lugar de los cereales que se producen en el mundo, donde se distinguen tres grandes productores: a) Antigua URSS con un promedio de 14 210.5 millones de toneladas, b) Estados Unidos aporta 6827.3 millones de toneladas y c) la Unión Europea 4210.0 millones de toneladas, que en conjunto suman 72% de la producción mundial, según el USDA, citado por ASERCA (1994). En Canadá, se cosecharon 287 327 ha (Rossnagel, 1990); en Yugoslavia, 26 800 ha (Mlinar, 1990), en Minnesota, 343 938 ha (Stuthman *et al.*, 1990), en Dakota del Norte, 263 047 ha (McMullen, 1990) y en Oregon, 26 328 ha (Karow y Dovel, 1990).

En el agroecosistema semiárido del norte-centro de México, se han cultivado hasta 240 000 ha de temporal y 22 000 ha de riego, en conjunto equivalen a 84% de la superficie nacional destinada a este cultivo (Salmerón y Dyck, 1993).

Cruz *et al.* (1991) condujeron un estudio en Guanajuato, donde evaluaron la concentración de metales pesados en el follaje de alfalfa, betabel, frijol, sorgo y maíz, regados con agua del río Lerma en el área de Salamanca, después de su paso por zonas industriales, entre ellas la Refinería PEMEX. Estos investigadores concluyeron que no se observó ninguna diferencia en la concentración de Cu, Zn y Pb; lo más interesante fue que en ninguno de los casos los valores fueron críticos.

Velásquez y Rodríguez (1991) realizaron un estudio en el Distrito de Mixquiahuala, Hidalgo, para evaluar el contenido de metales pesados en suelo y planta por el uso de aguas residuales y su efecto sobre el rendimiento y calidad de los cultivos de maíz y alfalfa. Respecto al suelo, concluyeron que los valores actuales de metales pesados registran tendencias de aumento, como lo señalaron Carrillo y Cajuste (1991).

Con relación a la planta reportaron que las concentraciones de estos metales fueron altas en las primeras etapas, disminuyendo al final del ciclo y, en particular, señalaron que el Cu, Zn, Pb, Cr y Co presentaron alto grado de contaminación en estos cultivos. Contrariamente a esto último, Siebe y Hernández (1991), al analizar y caracterizar la disponibilidad de los metales pesados en alfalfa y grano de maíz en sitios que tienen 80 años de regarse con aguas residuales, concluyeron que los metales Cd, Pb, Cr y Zn, introducidos en el suelo, sólo son

disponibles para las plantas en cantidades moderadas y únicamente el Cd es más disponible sin rebasar los límites normales.

MATERIALES Y METODOS

Localización y Clima del Sitio Experimental

El trabajo de campo se desarrolló durante el ciclo primavera-verano de 1992 con un productor cooperante, cuyo predio se localiza a 28°25' de latitud norte, 106°50' longitud oeste, del meridiano de Greenwich, a una altitud de 2100 m. Según la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1973) el clima es semiseco templado (Bs1 Kw) con lluvias de 6.1 mm de febrero a junio, al 80% de probabilidad.

Establecimiento del Estudio

El presente trabajo se estableció el 19 de febrero, sobre una superficie de 0.4 ha; el suelo es de textura franco arenoso, pendiente de 1.5%, pH ligeramente alcalino (8.1), sin problemas de sales ($CE = 0.92 \text{ dS m}^{-1}$), pobre en materia orgánica (1.15%), muy bajo contenido de nitratos (9.6 mg kg^{-1}) y extremadamente rico en potasio (835 mg kg^{-1}). Se sembró la variedad Papigochi en una densidad de siembra de 100 kg ha^{-1} , con una sembradora se depositó la semilla a una profundidad de 4 a 5 cm, en hileras separadas a 20 cm.

Diseño Experimental

El cultivo de la avena se trató con dosis de nitrógeno y fósforo; del primer elemento se utilizaron cuatro niveles (0, 80, 160 y 240 kg ha^{-1}) y del segundo otros cuatro (0, 40, 80 y 120 kg ha^{-1}), a partir de los cuales se seleccionaron 10 tratamientos con la Matriz Plan Puebla I, para dos factores [Turrent, citado por Rojas (1981)], además se adicionó un tratamiento de 100 kg ha^{-1} de potasio. Los 10 tratamientos resultantes se establecieron en franjas de 5 m de ancho y 80 m de largo, de donde se obtuvieron cuatro repeticiones por tratamiento.

Aplicación de los Fertilizantes

La aplicación de las dosis de fertilizantes se hizo al voleo, en forma fraccionada; un tercio del nitrógeno y la mitad del fósforo y potasio a la siembra; una

cantidad similar al amacollamiento, finalmente un tercio del nitrógeno en la etapa de encañe de la avena. Como fuente del nitrógeno, fósforo y potasio, se utilizó sulfato de amonio, superfosfato triple de calcio y sulfato de potasio, respectivamente.

Aplicación del Agua de Riego

El agua, con la que se produjo la avena, se tomó directamente del vaso de la Laguna, haciendo un cárcamo para subir el agua con una bomba portátil, la cual se impulsó con la toma de fuerza de un tractor. El agua se condujo por una tubería de aluminio de 3" hasta llegar al predio en cuestión, donde se regó por aspersión portátil. Se permitieron abatimientos aproximados a 50% de la humedad aprovechable, y se monitoreó la humedad a través del método gravimétrico.

Análisis de la Calidad del Agua de Riego

Los criterios e índices de clasificación del agua de riego se hicieron con la técnica establecida por Palacios y Aceves, citados por Aguilera y Martínez (1986).

Conductividad eléctrica. Se determinó usando el puente de wheatstone, método descrito por Wilcox (1950). De los **aniones:** el boro se cuantificó colorimétricamente, usando carmín de acuerdo con Hatcher y Wilcox (1950). Los carbonatos y bicarbonatos, por titulación [American Public Health Association and American Water Works Association (1946)]. Los sulfatos según el procedimiento descrito por la Association of Official Agricultural Chemists (1950). Los cloruros en el agua, usando la metodología de la Association of Official Agricultural Chemists (1950).

Para la valoración de los **cationes:** el calcio y magnesio según Cheng y Bray (1951). Para calcular la cantidad de sodio, se usó el método gravimétrico con acetato de uranio y zinc (Barber y Kolthoff, 1928). El potasio tomando como base la referencia de Williams (1941).

Evaluación de Elementos Pesados

Dado que la concentración de elementos pesados puede ser riesgosa para la salud humana al consumir la avena producida, se enviaron muestras de la semilla del cereal en cuestión al laboratorio de Química de Suelos en el Centro de Edafología del Colegio de

Postgraduados en Montecillo, estado de México, para la determinación del contenido de Pb, Cd, Ni, Co y Cr, de acuerdo con la metodología propuesta por Tserling (1969). Estos mismos elementos se determinaron en el agua de riego, tomando como base la técnica de US-EPA (1973), así como en el suelo, donde se produjo avena, la de Lindsay y Norvell (1978). En la interpretación de los resultados se tomó en cuenta la información reportada por Rodier *et al.* (1981), también la de Wallace *et al.* y Wallace y Romney, citados por Macnicol y Beckett (1985).

Análisis Estadístico y Económico

El rendimiento de avena se evaluó con base en la producción de grano en cada uno de los tratamientos de fertilizantes establecidos, la parcela útil fue de 9 m² (3.0 m*3.0 m). Con los datos obtenidos, se practicó un análisis de varianza bajo un diseño completamente al azar y, en la comparación de medias, se utilizó la prueba de DMS al 5 % de probabilidad. A la producción de avena cosechada de estos tratamientos, se le hizo un análisis económico, tomando en cuenta la metodología descrita por Perrin *et al.* (1976).

RESULTADOS Y DISCUSION

Efecto del Fertilizante en el Rendimiento del Grano

Hubo una gran respuesta del cultivo a las aportaciones de nitrógeno, ya que con 80-0-0 se registraron 1945 kg ha⁻¹ de grano (Cuadro 1). El tratamiento de 240 kg ha⁻¹ de nitrógeno con 80 kg ha⁻¹

de fósforo fue el que produjo el mayor rendimiento de grano (2245 kg ha⁻¹) y una buena eficiencia en el uso del agua (0.62 kg/1000 L de agua). Sin embargo, el incremento fue de 10% respecto a 2041 kg ha⁻¹, producidos con 80 y 40 kg ha⁻¹ de nitrógeno y fósforo, respectivamente, sin diferencia significativa.

Es importante observar que las aplicaciones de fósforo no incrementaron significativamente el rendimiento de grano de avena, ya que la fórmula 80-40-0 produjo un incremento de 96 kg ha⁻¹, sobre la fórmula 80-0-0, y la dosis 160-120-0 una diferencia de 112 kg ha⁻¹ sobre el tratamiento 80-40-0, resultando estadísticamente iguales. Por otro lado, se consignó que, con la aplicación de 100 kg ha⁻¹ de potasio, no se incrementó el rendimiento de grano de avena, ya que con la fórmula 160-80-100 se cosecharon 1539 kg ha⁻¹ de grano y con la fórmula 160-80-0 se obtuvo un rendimiento de 1782 kg ha⁻¹.

La calidad del agua (C₃ S₁), antes de iniciar el trabajo de campo, cambió a C₃ S₄, después de la cosecha (Cuadro 2), lo cual repercutió ligeramente en la producción de avena, ya que el máximo rendimiento de grano reportado fue de 2059 kg ha⁻¹, mientras que en un trabajo hecho por Ortiz y Amado (2000), con la misma variedad Papigochi y agua de buena calidad C₁ S₁ se cosecharon 2127.2 kg ha⁻¹.

Análisis económico del rendimiento de grano. El beneficio bruto del rendimiento de grano fluctuó de \$192 000.00 a \$1 459 000.00, generados con las fórmulas 0-40-0 y 240-80-0 de N-P₂O₅ y K₂O, respectivamente. El beneficio neto osciló de \$111 000.00 a \$1 047 000.00, obtenidos con las fórmulas 0-40-0 y 80-0-0, respectivamente. Se reitera que no es necesaria la aplicación de 40 kg ha⁻¹ de

Cuadro 1. Producción de avena para grano con diferentes niveles de fertilización, regada con agua de la Laguna de Bustillos, Chihuahua. 1992.

Tratamiento	Rendimiento				Media
	I	II	III	IV	
	----- kg ha ⁻¹ -----				
80-40-0	1935	1660	2330	2239	2041 a
80-80-0	1640	2180	2105	2310	2059 a
160-40-0	2390	1930	1640	1838	1950 a
160-80-0	1785	1682	2040	1620	1782 b
0-40-0	215	270	370	330	296 c
240-80-0	2198	2386	2010	2386	2245 a
80-0-0	2350	1390	2060	1980	1945 a
160-120-0	2007	2080	2520	2007	2153 a
160-80-100	1628	1450	1540	1539	1539 b
0-0-0	290	270	550	405	379 c

CV = 16.01%. DMS = 394.1.

Medias con igual letra no difieren estadísticamente entre sí (DMS).

Cuadro 2. Dinámica de la calidad del agua de la Laguna de Bustillos chihuahua. PONDERCEL-CESICH. 1992.

Indice	Ciclo 1992		
	Marzo [†]	Junio	Octubre [†]
	Cationes (meq L ⁻¹)		
Ca ²⁺	0.26	0.20	1.00
Mg ²⁺	0.16	0.55	0.32
Na ⁺	1.88	18.32	21.97
K ⁺	0.16	0.71	0.64
	2.46	19.78	23.93
	Aniones (meq L ⁻¹)		
CO ₃ ²⁻	0.96	1.22	3.24
HCO ₃ ⁻	4.96	12.60	11.16
SO ₄ ²⁻	3.75	2.70	6.40
Cl ⁻	5.20	6.40	3.76
	14.87	22.92	24.56
	Otros		
pH	8.32	8.44	8.61
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	1446.5	1787.8	2050.0
RAS (meq L ⁻¹)	4.10	29.92	27.04
Clasificación	C ₃ S ₁	C ₃ S ₄	C ₃ S ₄

[†] Inicio del estudio. [†] Después de la cosecha.

fósforo, ya que no es redituable. Esta situación se corrobora al comparar las dosis testigo (0-0-0) donde el beneficio neto fue de \$246 000.00 ha⁻¹, mientras que con 0-40-0, la ganancia neta fue de sólo \$111 000.00 ha⁻¹ (Cuadro 3).

Los tratamientos no dominados fueron el testigo 0-0-0 y el 80-0-0; este último fue el único que tuvo una tasa de retorno marginal atractiva de 369%, lo cual significa que, al usar esta fórmula que cuesta \$217 000.00, produce un incremento en el beneficio neto de \$801 000.00, que equivale a una ganancia de 369% (Cuadro 4).

En el análisis económico de la producción de avena para grano, se determinó que la fórmula de

Cuadro 3. Análisis económico del rendimiento de grano de avena, regada con agua de la Laguna de Bustillos. Campo Experimental Sierra de Chihuahua. 1992.

Tratamiento N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	Rendimiento kg ha ⁻¹	Valor de la cosecha	Costo de producción	Beneficio neto
			\$*10 ³	
80- 40-0	2041	1327	293	1034
80- 80-0	2059	1338	361	977
160- 40-0	1950	1268	517	751
160- 80-0	1782	1158	596	562
0- 40-0	296	192	81	111
240- 80-0	2245	1459	813	646
80- 0-0	1945	1264	217	1047
160-120-0	2153	1399	678	721
160- 80-100	1539	1000	878	122
0- 0-0	379	246	0	246

El valor de la cosecha se calculó con base en el precio comercial en 1992 de \$ 650.00 por kg.

Cuadro 4. Análisis marginal de tratamientos no dominados económicamente en la producción de grano de avena. Campo Experimental Sierra de Chihuahua. 1992.

Tratamiento N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	Beneficio neto	Costo variable	Inc. marginal BN	CV	Tasa de retorno marginal %
		\$*10 ³			
80-0-0	1047	217	801	217	369
0-0-0	246	0			

fertilización más redituable es la 80-0-0, bajo las condiciones establecidas.

Análisis de Elementos Pesados en Planta, Agua y Suelo

Los resultados del análisis de elementos pesados (Pb, Cd, Ni, Co y Cr), reportados en el grano de avena producido en el suelo y agua usada para la producción de este cultivo en la rivera de la Laguna de Bustillos, son los siguientes.

Plomo. No se detectó el plomo ni en suelo ni en las aguas que se utilizaron para la producción de avena; en grano y planta, se consignaron sólo trazas de este elemento (Cuadro 5), por lo que se afirma que no hay problemas de contaminación para el consumo humano o animal. Las Normas Americanas de Clasificación, citadas por Rodier *et al.* (1981), indican que la concentración máxima en el agua potable es de 0.05 mg L⁻¹, ya que si la concentración sobrepasa el nivel citado, causará efectos nocivos a la salud humana, como trastornos clínicos, biológicos y alteraciones histopatológicas.

Cadmio. En este estudio, se encontraron en el suelo 0.003 mg L⁻¹ y en agua menos de 0.001 mg L⁻¹, mientras que en grano y planta se reportaron únicamente trazas (Cuadro 5). Esto permite afirmar

Cuadro 5. Concentración de elementos pesados en suelo, avena y agua. Campo Experimental Sierra de Chihuahua. 1992.

Material analizado	Plomo	Cadmio	Niquel	Cobalto	Cromo
	mg kg ⁻¹				
Suelo	0	0.003	0	0	0
Grano avena	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr
Planta avena	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr
Agua (mg L ⁻¹)	0	0.001	0	0.015	0
Concentración máxima permitida	0.05	0.01	1.0	5.0 suelo	0.05

Tr = Trazas (cantidades insignificantes).

Cuadro 6. Evapotranspiración real de la avena sometida a dosis de fertilizantes e irrigada con agua de la Laguna de Bustillos. Campo Experimental Sierra de Chihuahua. 1992.

Fecha de riego	Profundidad del suelo cm	Capacidad de campo ----- % -----	Humedad antes riego -----	Densidad aparente g cm ⁻³	Lámina neta ----- cm -----	Et Máx. acumulada
12 de marzo	0 a 22	10.6	6.9	1.39	1.13	1.13
26 de marzo	0 a 22	10.6	5.9	1.39	1.43	2.56
8 de abril	0 a 22	10.6	6.2	1.39	1.34	3.90
21 de abril	0 a 22	10.6	5.5	1.39	1.55	5.45
29 de abril	0 a 22	10.6	6.8	1.39	1.16	6.61
13 de mayo	0 a 22	10.6	6.6	1.39	1.24	7.85
26 de mayo	0 a 22	10.6	6.7	1.39	1.20	9.05
Lluvia efectiva = 3.0 cm.						12.05

que no hay problemas de toxicidad con Cd en los parámetros analizados. La toxicidad de este elemento en el hombre causa trastornos renales, alteraciones óseas e hipertensión arterial.

Níquel. Los datos al respecto (Cuadro 5) señalan presencia del elemento únicamente en el grano y la planta a nivel de trazas. Esto indica que no hay ninguna peligrosidad de contaminación de níquel en el rendimiento de avena. Rodier *et al.* (1981) señalaron que el níquel y sus sales son poco tóxicos, salvo el carbonilo de níquel.

Cobalto. Las normas, señaladas por Rodier *et al.* (1981), indican que el límite de concentración de cobalto es de 1.0 mg L⁻¹ en agua. Valores superiores a esta cifra traen, como consecuencia, alteraciones en el sistema nervioso, cardiovascular y sanguíneo. Afortunadamente, en el presente estudio, no se encontraron cantidades considerables en suelo, agua y planta de avena (Cuadro 5), y se concluye que no hay problemas de contaminación por el consumo del cereal estudiado.

Cromo. Las normas internacionales, citadas por Rodier *et al.* (1981), marcan que la concentración crítica de cromo es a partir de 0.05 mg L⁻¹; cualquier cantidad consumida por arriba de esta cifra puede provocar una acción tóxica hepatorenal y cáncer. En el presente estudio no se registró presencia de Cr en el suelo y agua, sólo hubo trazas en planta y grano de avena (Cuadro 5).

Cantidad de Agua Aplicada

La evapotranspiración real de la avena (Cuadro 6) fue de 12.05 cm, valor que se considera bajo en comparación con otros estudios. Por ejemplo, De la Peña (1987) reportó que la lámina total consumida de trigo fue de 42.9 cm. Sin embargo, esta variación se debió, entre otras cosas, al control de la humedad del

suelo y a la profundidad estudiada, ya que el perfil del suelo, donde crecieron 95% de las raíces de avena durante todo el ciclo de cultivo, fue de 22 cm, a pesar de ser un suelo ligero y sin restricciones por compactación.

Con las características descritas, las láminas netas en los siete riegos fueron bajas; la Figura 1 muestra el control de humedad del suelo de donde se calculó el valor de cada una de las láminas netas de riego, las cuales fluctuaron desde 1.13 hasta 1.55 cm, más la lluvia efectiva (3.0 cm, seleccionada al considerar lluvia igual o mayor que 5 mm por evento), acumulan un total de 12.05 cm. La lámina bruta aplicada por aspersión, en promedio fue de 5.18 cm por riego, es decir, que en total se aplicó una lámina bruta de 36.26 cm, equivalentes a 3626 m³ ha⁻¹ de agua proveniente de la Laguna de Bustillos. Estudios recientes (Amado *et al.*, 2000) registraron

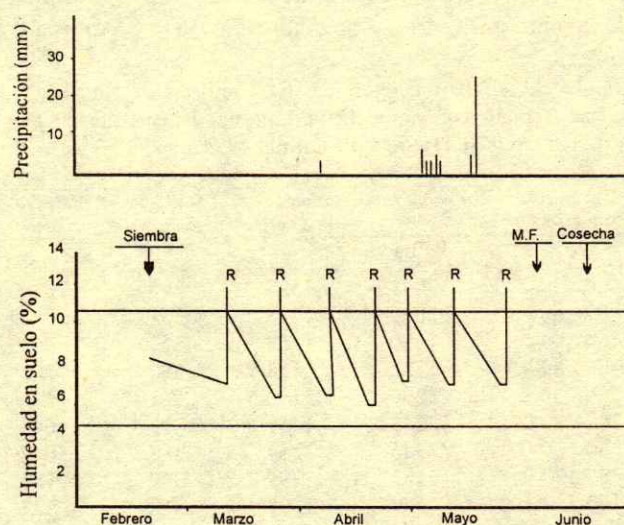


Figura 1. Control de la humedad del suelo en el cultivo de avena. Ejido Favela. CESICH. 1992.

rendimientos en grano de avena de 2289 y 3816 kg ha⁻¹ en dos ciclos continuos, utilizando un volumen bruto de agua de 3000 m³ ha⁻¹.

CONCLUSIONES

- Se produjeron grano y forraje de avena libre de elementos pesados, usando agua residual de la Laguna de Bustillos.
- La porción 80-0-0 de N-P₂O₅-K₂O fue la más redituable económicamente para producir avena (1945 kg ha⁻¹ de grano), generando beneficios netos de \$801 000.00 por ha, superando con 1566 kg ha⁻¹ al testigo absoluto 0-0-0.
- Se practicaron siete riegos de auxilio, sumando un volumen total de 3626 m³ de agua ha⁻¹. La eficiencia de producción en el tratamiento 80-0-0 fue de 0.54 kg de grano por m³ de agua utilizado.
- La calidad del agua de riego cambió durante el desarrollo de la avena, pasando de C₃ S₁ a C₃ S₄.
- La concentración de elementos pesados (Pb, Cd, Ni, Co y Cr) en grano de avena, el suelo y agua encontrados en el estudio indican que no tienen problemas de contaminación.

LITERATURA CITADA

- Aguilera C., M. y R. Martínez E. 1986. Relaciones agua-suelo-planta-atmósfera. 3a ed. Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.
- Amado A., J.P., V.D. Solano R., S. Ramírez V. y P. Ortiz Franco. 1991. Uso del agua de la Laguna de Bustillos para la germinación de especies agrícolas. Campo Experimental Sierra de Chihuahua-CIFAP-Norte Centro-INIFAP-Secretaría de Recursos Hidráulicos. Cd. Cuauhtémoc, Chih. (Informe de Investigación sin publicar).
- Amado A., J.P., V.D. Solano R. y P. Ortiz F. 1993. El agua de la laguna de Bustillos, Chihuahua: Posibilidades de uso en agricultura. Folleto Técnico 4. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Centro de Investigación Regional del Norte Centro-Campo Experimental Sierra de Chihuahua. Cd. Cuauhtémoc, Chih. México.
- Amado A., J.P., P. Ortiz F. y J.J. Salmerón Z. 2000. Manejo agronómico de la avena en la Sierra de Chihuahua (Variedades, agua, densidad de siembra y fertilización mayor). Folleto Científico No. 7. CESICH-CIRNOC-INIFAP-SAGAR. Cd. Cuauhtémoc, Chih.
- American Public Health Association and American Water Works Association. 1946. Standard methods for the examination of water and sewage. ed. 9. Illus. New York.
- ASERCA. 1994. Más allá de nuestros campos. Panorama mundial de la avena. pp. 14-21. In: G.O. Terroba (ed.). Claridades agropecuarias. ASERCA-Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. No. 14. José Ma. Ibarrán 84, 5o piso, Col. San José Insurgentes, México DF.
- Association of Official Agricultural Chemists. 1950. Official and tentative methods of analysis of the Association of Official Agricultural Chemists. ed. 7. Washington.
- Barber, H.H. e I.M. Kolthoff. 1928. A specific reagent for the rapid gravimetric determination of sodium. Am. Chem. Soc. J. 50: 1625-1631.
- Carrillo G., R. y L. J. Cajuste. 1991. Acumulación de Pb, Cr y Cd a través del tiempo, en suelos regados con aguas residuales. p. 72. In: J.L. Tovar S., R. Quintero L. (eds.). La Investigación Edafológica en México 1990-1991. Memorias del XXIV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Pachuca, Hgo. México.
- Cheng, K.L. y H.R. Bray. 1951. Determination of calcium and magnesium in soil and plant material. Soil Sci. 72: 449-458.
- Cruz C., J.L., R.E. García P. y F. Rodríguez N. 1991. Metales pesados en cultivos de la zona del Río Lerma, Gto. pp 71. In: J.L. Tovar S., R. Quintero L. (eds.). La Investigación Edafológica en México 1990-1991. Memorias del XXIV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Pachuca, Hgo. México.
- De la Peña, I. 1987. Manual del uso y manejo del agua. Departamento de Divulgación del Distrito de Desarrollo Rural 148, "Cajeme", Cd. Obregón, Sonora.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarlo a condiciones de la República Mexicana. 2a ed. Universidad Nacional Autónoma de México-Instituto de Geografía, México.
- Hatcher, J.T. y L.V. Wilcox. 1950. Colorimetric determination of boron using carmine. Anal. Chem. 22: 567-569.
- Karow R., P.H. y R. Dovel. 1990. OREGON. p. 68. In: M.S. McMullen (ed.). Oat News Letter 41. Department of Crop and Weed Sciences. North Dakota State University Fargo, N.D. 58505.
- Lindsay, W.L. y W.A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil, zinc, iron, manganese and copper. J. Am. Sci. Soil. 42: 421-428.
- Macnicol, R.D. y P.H.T. Beckett. 1985. Critical issue concentrations of potentially toxic elements. Plant Soil 85: 107-129.
- McMullen, M.S. 1990. North Dakota. p. 65. In: M.S. McMullen (ed.). Oat News Letter 41. Department of Crop and Weed Sciences. North Dakota State University Fargo, N.D. 58505.
- Mlinar R., D. 1990. Oat in Sr Croatia. pp: 49-50. In: M.S. McMullen (ed.). Oat News Letter 41. Department of Crop and Weed Sciences. North Dakota State University Fargo, N.D. 58505.
- Ortiz F., P. y J.P. Amado A. 2000. Parámetros de rendimiento en variedades de avena bajo diferentes láminas de riego. Riego y drenaje, Elsevier, Barcelona, España. (En prensa).
- Perrin, R.D., D.L. Winkelmann, E.R. Moscardi y J.R. Anderson. 1976. Formulación de recomendaciones a partir de datos agronómicos: Un manual metodológico de evaluación económica. CIMMYT, México, DF.
- Rodier, J., Ch. Grofray, G. Kovascsik, J. Laporte, M. Plissier, J. Scheidhaver, J. Verneaux, J. Vial y L. Rodi. 1981. Análisis de las aguas, aguas naturales, aguas residuales, agua de mar. Química fisicoquímica, bacteriología. Trad. al Español de Santiago Balqué Dolz. Omega, Barcelona, España.
- Rojas M., B.A. 1981. Planeación y análisis de los experimentos de fertilizantes. Folleto misceláneo 41. INIA-Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México DF.

- Rosnagel B., G. 1990. Oat in Saskatchewan. p. 42. *In*: M.S. McMullen (ed.). Oat News Letter 41. Department of Crop and Weed Sciences. North Dakota State University Fargo, N.D. 58505.
- Salmerón Z., J.J. y P. Dyck S. 1993. Variedades mexicanas de avena. Folleto Técnico 1. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos-Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias-Centro de Investigación Regional del Norte Centro-Campo Experimental Sierra de Chihuahua, Cd. Cuauhtémoc, Chih.
- Siebe, C. y G. Hernández. 1991. Metales pesados absorbidos por cultivos de alfalfa y de maíz en el Distrito de Riego 03, Tula, Hidalgo. Resúmenes del Simposio: Uso y Manejo de Aguas Residuales en la Agricultura. XXIV Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Pachuca, Hgo.
- Stuthman, D.D., H.W. Rines, R.D. Wilcoxson, S.R. Simmons, L.L. Hardman y K.J. Leonard. 1990. Minesota. p. 58. *In*: M.S. McMullen (ed.). Oat News Letter 41. Department of Crop and Weed Sciences. North Dakota State University Fargo, N.D. 58505.
- Tserling, V.V. 1969. Diagnosis of nutrition of plants. pp. 706-709. *In*: Agronomical methods in study of soils. Dokuchaev Inst. of Soil Sci. Academy of Sci. of the URSS. Translated from Russian.
- US-EPA. 1973. Water quality criteria. EPA. RE/73-033 197. US Environmental Protection Agency. Washington, DC. Determine of potassium with dipicrylamine. Am. Soc. Hort. Sci. Proc. 39: 47-50.
- Vásquez U., C., E. Salazar S., R. Figueroa V. y A. Reyes R. 1992. Efecto del agua residual de la termoeléctrica Francke en el suelo y cultivo de la avena en la F.A.Z. de la U.J.E.D. pp.112. *In*: J.L. Tovar S. y R. Quintero L. (eds.). La Investigación Edafológica en México 1991-1992. Memorias de XXV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Acapulco, Gro. México.
- Velásquez H., A. y C. Rodríguez Z. 1991. Evaluación del contenido de metales pesados en suelo-planta por el uso de aguas residuales sobre el rendimiento y calidad de los productos agrícolas en el D.D.R., Mixquiahuala. Resúmenes del Simposio: Uso y Manejo de Aguas Residuales en la Agricultura. XXIV Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo. Pachuca, Hgo.
- Wilcox, L.V. 1950. Electrical conductivity. Am. Water Works Assoc. J. 42: 775-776
- Williams, W.D. 1941. Rapid determination of potasium with dipicrylamine. Am. Soc. Hort. Sci. Proc. 39: 47-50.

USO DEL AGUA DE LA LAGUNA DE BUSTILLOS PARA LA PRODUCCION DE MAIZ

Use of Water from Bustillos Lake for Maize Production

Pedro Ortíz Franco¹ y Jesús P. Amado Alvarez¹

RESUMEN

Durante el ciclo primavera-verano de 1992, se realizó un estudio de campo en el cultivo maíz con el propósito de registrar la factibilidad de usar el agua de la Laguna de Bustillos para producir grano en cantidad comercial cuya calidad permita su consumo humano. Los resultados del ciclo indicaron claramente que puede usarse el agua de la Laguna para producir maíz al nivel de 5.0 t ha⁻¹ de grano, sin que la producción de forraje y/o grano presenten contaminación por elementos pesados (Pb, Cd, Ni, Cr, y Co) que pongan en riesgo la salud humana. El estudio permitió adicionalmente saber que, para hacer más eficiente el proceso de producción de este cultivo, pueden usarse fertilizantes químicos con una dosis adecuada de 100 a 250 kg ha⁻¹ de nitrógeno y de 50 a 100 kg ha⁻¹ de fósforo. También se pudo detectar que algunas características del suelo, como el pH y la conductividad eléctrica, se incrementaron en forma preocupante con el uso de este tipo de agua, la cual pasó de C₃ S₁ a C₃ S₄ durante el ciclo del cultivo.

Palabras clave: Aguas residuales, productividad.

SUMMARY

During spring and summer, 1992, a study was conducted in the field to determine the feasibility of using water from Bustillos Lake to produce maize for human consumption commercially. The results clearly indicated that water from Bustillos Lake can be used. Five t ha⁻¹ of grain was produced, and neither forage nor grain was contaminated by heavy metals (Pb, Cd, Ni, Cr, and Co), which are harmful to human health. Also, the study showed that fertilizer, applied at 100

¹ Campo Experimental Sierra de Chihuahua. CIRNOC-INIFAP. Apartado Postal 554, Ciudad Cuauhtémoc, Chih. (ortizfp@infosel.net.mx)

Recibido: Octubre de 1996. Aceptado: Mayo de 2001.
Publicado en Terra 19: 183-189.

to 250 kg N ha⁻¹ and 50 to 100 kg P₂O₅ ha⁻¹, can make maize production more efficient. It was also detected that some soil characteristics, such as pH and electric conductivity, increased excessively with the use of this water, which changed from C₃ S₁ to C₂ S₄ during the cropping season.

Index words: Residual water, productivity.

INTRODUCCION

En 1989, la Comisión Nacional del Agua (CNA) informó que en la región hidrológica No. 34, conocida como "Cuenca Cerrada del Norte", se encuentra localizada la Laguna de Bustillos, con un área de 200 km², y capacidad aproximada de almacenamiento de agua de 148 millones de m³, con que, en teoría y en términos de usar el citado volumen al 50%, se podrían regar aproximadamente 9000 ha (cultivos con evapotranspiración anual de 800 mm).

Amado *et al.* (1991a) realizaron un análisis previo del agua de esta laguna y reportaron una clasificación C₃ S₃, la cual no es recomendable para el uso de cultivos agrícolas comunes, por el alto contenido de sales, alta concentración de carbonatos de sodio y presencia de elementos tóxicos.

No obstante los resultados citados, y considerando que la concentración del agua de la Laguna varía ampliamente a través del año, debido a que constantemente están llegando escurrimientos superficiales de la cuenca, que esencialmente traen consigo agua y suelo de buena calidad (principalmente agua de lluvia, 750 y 573 mm en 1990 y 1991, respectivamente), además del suelo de la capa más fina de los terrenos donde se produce erosión, esta agua puede utilizarse para la producción de cultivos.

Durante julio, Amado *et al.* (1991b) evaluaron los procesos de germinación y emergencia de 27 especies agrícolas en invernadero, usando suelo del lecho de la Laguna y de la parte aledaña, así como agua tomada directamente de la Laguna, físicamente filtrada y potable. Los resultados del estudio fueron muy alentadores en lo general y en particular cuando se

usaron suelo agrícola y agua tomada en forma directa de la Laguna, en donde cultivos como sorgo, maíz, calabaza y trigo, mostraron emergencia desde 78 a 98%.

Con los antecedentes citados y considerando que existe un potencial prometedor en el uso del recurso hídrico de la Laguna, se planteó un estudio con el objetivo de determinar, en campo, la factibilidad de usar el agua de la Laguna para producir maíz en cantidades comerciales, cuya calidad permita su consumo humano.

REVISION DE LITERATURA

La calidad de los productos obtenidos a través de la actividad agrícola está determinada, en gran medida, por la calidad del agua, empleada en el riego de los cultivos. En México, al igual que en otros países, las aguas residuales urbanas e industriales son empleadas, con alguna frecuencia, para regar cultivos agrícolas de consumo animal o humano. Esta agua, que la mayoría de las veces es depositada en el lecho de los ríos, lagunas o vasos de almacenamiento, casi nunca recibe el tratamiento de limpieza adecuado, por lo que puede contener una gran cantidad de contaminantes, como los metales pesados (Carrillo *et al.*, 1992).

De acuerdo con Guajardo *et al.* (1992), se prevé que aumente el empleo de aguas residuales, debido a que la demanda de agua blanca en la agricultura es cada vez mayor. Actualmente, representa más de 60% del agua de este tipo, rebasando con mucho a la destinada para uso industrial y doméstico que apenas alcanza 30%. Una desventaja adicional es que ésta se usa en la agricultura por única vez, mientras que en los otros casos cabe la posibilidad del reciclaje y posteriormente reutilización, aunque siempre que se emplea agua residual existirá el riesgo de contaminación.

López *et al.* (1997) hicieron un trabajo con el objeto de evaluar el grado de mejoramiento de un suelo salino con desechos de la industria cítrica. Se utilizó un suelo con textura arcillo-limoso. Se aplicaron láminas de riego de 320, 640 y 960 mm, cuyo deshecho registró una conductividad eléctrica de 2.7 dS m⁻¹. Después de la aplicación, se tomaron muestras cada 20 cm, hasta 1 m de profundidad para determinar algunas características químicas. Los resultados obtenidos indican que los desechos de la industria cítrica pueden utilizarse como mejoradores de suelos salinos.

Carrillo *et al.* (1992) señalaron que en el ejido Mixquiahuala, en el estado de Hidalgo, se usan aguas residuales para riego desde principios del siglo y que, actualmente, los suelos tienen diferentes grados de contaminación. Sin embargo, no se tenía información suficiente sobre la tendencia de esa degradación en el tiempo y su efecto en la calidad de los productos agrícolas. Con base en los resultados, concluyeron que las concentraciones de Pb, Cr, Cd y micronutrientes en los suelos se han incrementado en función de los años de irrigación, pero no detectaron cambios al comparar suelos irrigados con agua residual durante 50 y 90 años.

Carrillo *et al.* (1992), en un trabajo realizado en el valle del Mezquital, en el estado de Hidalgo, señalan que las aguas residuales, residuales diluidas y drenaje agrícola, contienen impurezas que imponen limitaciones ligeras o moderadas para su uso en irrigación. Al regar alfalfa con estas mismas fuentes, las concentraciones de los metales Cr, Pb y Cd en el follaje fueron superiores a los niveles normales. Esto causó que la calidad del forraje disminuyó debido a la posibilidad de que estos elementos se incorporen a la cadena alimenticia por esa vía.

Méndez *et al.* (1996) caracterizaron las aguas del río Atoyac en el estado de Puebla sobre metales pesados, boro, grasas y aceites, consignando que éstas se han afectado gradualmente durante su recorrido. Después de almacenar temporalmente su caudal en las presas Independencia y Valsequillo, se utiliza para riego agrícola en los municipios de Tecamachalco y Atlixco. Los resultados indicaron aguas con clasificación C₁ S₁, C₂ S₁ y C₃ S₁. Respecto a los niveles de contaminación, los valores promedio de grasas y aceites variaron de 196 a 339 mg L⁻¹, valor que excede las 60 mg L⁻¹ establecidas como límite permisible para aguas con fines de uso agrícola. Sobre el boro: los valores también sobrepasaron el límite máximo permisible de 0.75 mg L⁻¹. Las cantidades de Cu, Zn, Co y Cd solubles no rebasaron los límites permisibles, no así los datos de Mn, los cuales sí excedieron los valores aceptados por la norma.

Briones y Elizondo (1985) realizaron un estudio con el propósito de evaluar la factibilidad de un proyecto de tratamiento y reciclaje de aguas residuales de la cervecera en la ciudad de Tecate, Baja California Norte. Se evaluaron sólidos suspendidos (SS), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), coliformes, conductividad eléctrica (CE) y relación de adsorción de sodio (RAS). Los resultados obtenidos

permitieron recomendar que las aguas residuales deben tratarse mediante un proceso biológico, más desinfección y, posteriormente, reciclarlas para la irrigación de jardines, campos deportivos y áreas potencialmente agrícolas. Después del tratamiento secundario, el pH, RAS y CE del afluyente deben monitorearse para determinar las necesidades de yeso o cal y el rendimiento de lavado de sales.

MATERIALES Y METODOS

El estudio se estableció en el lote de un agricultor cooperante del Ejido Favela del municipio de Cuauhtémoc, Chihuahua, ubicado al sureste de la Laguna de Bustillos. El suelo es de textura arenosa (61% de arena); ligeramente alcalino (pH de 8.4 a 8.9); sin problemas de sales (conductividad eléctrica de 0.47 a 1.48 dS m⁻¹); extremadamente pobre en materia orgánica (0.41 a 0.42%); muy bajo contenido de nitratos (5.0 a 9.0 mg kg⁻¹); extremadamente rico en potasio (490 a 648 mg kg⁻¹). El terreno tiene una pendiente aproximada de 1.5%. Durante la estación de crecimiento y con una probabilidad de 80%, el clima aporta 261 mm de lluvia (Ortiz *et al.*, 1990).

Establecimiento del Experimento

Las labores de presiembra, que consistieron en dar un paso de rastra y cruza para eliminar malezas y emparejar un poco el terreno, se realizaron el 26 de abril de 1992, después se aplicó un riego de presiembra (por aspersión) y el 29 de abril se sembró maíz híbrido americano RX-956 W con una densidad de siembra de 80 000 plantas por hectárea.

Espacios de exploración y diseño experimental. Se estudió nitrógeno (en los niveles de 100, 250, 400, 550 kg ha⁻¹) y fósforo (en niveles de 50, 100, 150, y 200 kg ha⁻¹). Se hizo la selección de tratamientos a través de la Matriz Plan Puebla I para dos factores (Turrent, citado por Rojas, 1981). Se adicionaron dos porciones como testigo (0-0-0 y 250-150-100 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O). En el Cuadro 1, se anotan los tratamientos resultantes, los cuales se establecieron en campo bajo el diseño completamente al azar, con cuatro repeticiones. La aplicación de los fertilizantes se hizo en forma manual y en banda. Por tratarse de un suelo arenoso, el fertilizante se proporcionó en forma fraccionada, aplicado 50% a la siembra y el resto en la primera labor del cultivo.

Tamaño de la parcela. El tamaño de la parcela experimental fue de 0.4 ha. Los diez tratamientos se

establecieron en el campo en franjas de 5 m de ancho por 80 m de largo. Como parcela útil se consideró a los cuatro surcos centrales (se sembró a 0.86 cm entre surcos) de cada franja, por 10 m de largo.

Parámetros Evaluados

En el suelo. Se realizaron dos muestreos de suelo: uno previo al establecimiento del estudio (abril de 1992) y otro posterior (noviembre de 1992), después de haber hecho cinco perfiles representativos dentro del área de estudio, y delimitar tres horizontes de acuerdo con la metodología propuesta por Cuanalo (1975), se consideraron tres profundidades (0 a 15, 15 a 37 y 37 a 80 cm), con el objeto de obtener información acerca de los cambios químicos (principalmente sales), inducidos por el uso del agua. También se determinaron textura (Bouyoucos, 1962), pH (Goijberg y Aguilar, 1987), materia orgánica (León y Aguilar, 1987), nitratos (Bremer, 1965), fósforo (Olsen *et al.*, 1954) y potasio (Jackson, 1970).

En el agua. Se hicieron tres muestreos: uno previo (marzo de 1992) y dos más durante el desarrollo del cultivo (abril y junio de 1992). Los criterios e índices de clasificación del agua de riego se hicieron considerando la técnica establecida por Palacios y Aceves, citados por Aguilera y Martínez (1986); conductividad eléctrica (Wilcox, 1950); boro (Hatcher y Wilcox, 1950); carbonatos y bicarbonatos [American Public Health Association and American Water Works Association (1946)]; sulfatos y cloruros (Association of Official Agricultural Chemists, 1950); calcio y magnesio (Cheng y Bray, 1951); sodio (Barber y Kolthoff, 1928); y potasio (Williams, 1941).

Cuadro 1. Tratamientos de nitrógeno, fósforo y potasio, uso del agua de la Laguna de Bustillos para la producción de maíz. Proyecto Laguna de Bustillos. INIFAP-CESICH. 1992.

Tratamiento	Factores		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	kg ha ⁻¹		
1	250	100	0
2	250	150	0
3	400	100	0
4	400	150	0
5	100	100	0
6	550	150	0
7	250	50	0
8	400	200	0
9 [†]	100	50	0
10 [†]	250	150	100

[†] Tratamientos adicionales.

En la planta. Se tomaron datos de altura de planta (AP) en la etapa de floración. En la cosecha, se tomó información por separado de materia seca (MS) y rendimiento de grano (RG).

Evaluación de Elementos Pesados

Dado que la concentración de elementos pesados puede ser riesgosa para la salud humana, al consumir el maíz producido, se consignó el contenido de Pb, Cd, Ni, Co y Cr, de acuerdo con la metodología propuesta por Tserling (1969). Estos mismos elementos se determinaron en el agua de riego, tomando como base la técnica de US-EPA (1973), así como en el suelo, donde se produjo maíz, la de Lindsay y Norvell (1978). En la interpretación de los resultados, se tomó en cuenta la información reportada por Rodier *et al.* (1981), también la de Wallace *et al.* y Wallace y Romney, citados por Macnicol y Beckett, (1985).

Análisis Estadístico

A las tres variables dependientes: altura de planta (AP), materia seca (MS) y rendimiento de grano (RG), se les practicó un análisis de varianza. Para establecer las diferencias estadísticas entre tratamientos, se empleó la prueba de rango múltiple de Duncan al 0.05 (Little y Jackson, 1979).

RESULTADOS Y DISCUSION

Análisis del Cultivo Producido

Parámetros evaluados en la planta.

Altura de planta. El análisis de varianza reportó diferencias altamente significativas para tratamientos, con coeficiente de variación de 10%. En el Cuadro 2, se muestra la comparación de medias donde, para esta variable, el mejor porte (numérico) se obtuvo con el tratamiento 400-100-0 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O, con 1.77 m, que fue estadísticamente igual a otros siete tratamientos en donde están involucrados desde 100 kg ha⁻¹ de N y desde 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅. Es importante señalar, que el tratamiento testigo presentó una altura de sólo 0.42 m, lo cual significa que la fertilidad natural del suelo es muy baja (como lo mostró el análisis químico) y que, no obstante la mala calidad del agua (C₃ S₄), permite el uso de fertilizantes químicos con efectos positivos en el crecimiento del cultivo.

Cuadro 2. Comparación de medias, para altura de planta y materia seca (parte aérea). Ejido Favela. Ciclo 1992.

Tratamiento N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	Altura de planta m	Tratamiento N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	Materia seca t ha ⁻¹
400-100-0	1.77 a	250-100-0	12.812 a
200-150-100	1.75 a	250-150-0	12.389 a
550-150-0	1.71 a	250-150-100	12.015 a
250-150-0	1.67 a	400-200-0	10.750 b
100-100-0	1.56 a	550-150-0	10.368 b
400-150-0	1.56 a	400-100-0	9.166 c
250-50-0	1.56 a	100-100-0	8.456 c
250-100-0	1.55 a	100-50-0	6.544 d
400-200-0	1.50 b	250-50-0	6.338 d
100-50-0	1.50 b	450-150-0	6.118 d
0-0-0	0.42 e		
Duncan 0.05	0.25		1.392

Las medias con igual letra en columna son estadísticamente iguales.

Materia seca (parte aérea). El análisis de varianza practicado a este parámetro reportó diferencias altamente significativas entre tratamientos con un coeficiente de variación de 12.74%. La comparación de medias se presenta en el Cuadro 2. De acuerdo con esta información, tres tratamientos resultaron estadísticamente iguales entre sí; estos fueron 250-100-0; 250-150-0 y 250-150-100 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O, con producciones de 12.812, 12.389 y 12.015 t ha⁻¹, respectivamente; cantidades que los hacen ser superiores al resto de las porciones evaluadas.

Es importante señalar que la respuesta al nitrógeno de esta variable fue hasta la dosis de 250 kg ha⁻¹ y a fósforo sólo a los 100 kg ha⁻¹. El tratamiento con potasio (250-150-100) tuvo un efecto igual al 250-150-0, lo que indicó la falta de respuesta del cultivo a este elemento.

Rendimiento de grano. En este parámetro se detectaron diferencias altamente significativas entre tratamientos, donde el coeficiente de variación fue de 19.9%, debido a que durante el periodo del 4 de julio al 19 de agosto se tuvieron problemas con el equipo de bombeo y esto ocasionó un efecto de variación adicional no previsto. De cualquier forma, los resultados se consideran válidos con un control experimental de 80%. Debido a la significancia detectada, se procedió a establecer la comparación de medias, detectando un grupo de cinco tratamientos con igual efecto estadístico y superiores al resto (Cuadro 3), dentro de los cuales nuevamente destacó el tratamiento 250-100-0 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O, con una producción media de 5.084 t ha⁻¹, seguido de los tratamientos 250-150-100 y 250-150-0 kg ha⁻¹ de

Cuadro 3. Comparación de medias para la variable rendimiento de grano. Ejido Favela. Ciclo 1992.

Tratamiento N-P ₂ O ₅ -K ₂ O	Rendimiento kg ha ⁻¹
250-100-0	5084 a
250-150-100	5002 a
250-150-0	4483 a
400-200-0	4353 a
400-100-0	4036 a
550-150-0	3583 b
100-100-0	2559 c
100-50-0	2452 c
400-150-0	2408 c
250-50-0	1463 e
Duncan 0.05	1275

Las medias con igual letra en columna son estadísticamente iguales.

N-P₂O₅-K₂O, cuyas producciones medias fueron de 5.00 y 4.48 t ha⁻¹, respectivamente.

Los rendimientos citados señalan una leve respuesta a la aplicación de potasio, debido a que se incrementó en 480 kg ha⁻¹ de grano con respecto al tratamiento respectivo (250-150-100 vs 250-150-0); además, el tratamiento 250-100-0 fue superior a los dos (5.084 t ha⁻¹), lo cual desvanece esta tendencia y confirma lo obtenido para materia seca. Es necesario señalar que, en ambos análisis (rendimiento de materia seca y grano de maíz), no se incluyeron los datos del testigo para detectar más acertadamente el efecto de adición nutrimental, dado que en materia seca éste produjo una cantidad despreciable y sólo unos granos de maíz. Con lo anterior, se demostró de manera clara que puede usarse racionalmente los fertilizantes para incrementar la producción de maíz, aun cuando se use agua de riego del tipo C₃ S₁ y C₃ S₄, como es el caso de la Laguna de Bustillos. En la producción de maíz, se usaron seis riegos de auxilio (por aspersión), con láminas promedio de 51.8 mm por riego más la lluvia (227 mm) se acumularon 537.8 mm.

Concentración de elementos pesados. Un aspecto muy importante de este trabajo fue detectar en qué medida el uso del agua de la Laguna de Bustillos, como fuente de riego, pudiera provocar concentraciones nocivas de elementos pesados que, a su vez, atentaran contra la salud humana. Afortunadamente, los reportes sobre los análisis de agua, suelo y material vegetal practicados (Cuadro 4), mostraron información alentadora, señalando que, en el suelo, no se detectaron concentraciones altas de Pb, Ni, Co, Cd y Cr, sólo pequeñas cantidades de Cd que no son importantes.

Cuadro 4. Concentración de elementos pesados en agua, suelo y material vegetal (maíz). Ejido Favela. Ciclo 1992.

Descripción	Concentración				
	Pb	Cd	Ni	Co	Cr
	----- mg kg ⁻¹ -----				
Suelo	0	0.003	0	0	0
Maíz (grano)	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr
Maíz (MS)	Tr	Tr	Tr	Tr	Tr
Agua (mg L ⁻¹)	0	0.001	0	0.015	0
Concentración max. permitida (mg L ⁻¹) Rodier <i>et al.</i> (1981)	0.05	0.01	1.0	5.0 suelo	0.05

Tr = Trazas (cantidades insignificantes). MS = Materia seca.

En el caso del material vegetativo, tanto en forraje como en grano, únicamente se detectaron concentraciones de los mismos elementos a nivel de "trazas" (cantidades insignificantes), debido al riego por aspersión. Con respecto al agua, no se detectaron concentraciones de Pb, Ni, ni Cr, sólo cantidades reducidas de Cd y Co, que se ubican muy por debajo de los límites máximos permitidos. Estos datos señalan claramente que, al menos para metales pesados para un ciclo de uso del agua de la Laguna de Bustillos, ésta no ocasionó niveles contaminantes en ninguna de las fuentes de agua, suelo o planta y el producto (grano y forraje), considerando que el grano de maíz producido bajo esta técnica puede usarse para el consumo humano.

Análisis de los Recursos Agua y Suelo

Cambios ocurridos en el suelo. En el Cuadro 5, se reportan los valores de pH y CE. Ahí se puede observar que la clasificación no sufrió cambios, pues en ambas fechas el suelo se clasificó libre de sales. Sin embargo, es importante señalar que el pH se incrementó en promedio 56 centésimas en un solo año de uso de esta agua, atendiendo a la escala logarítmica de esta característica, entonces la concentración de iones H⁺ se redujeron, lo cual es muy alto si se considera el tiempo tan reducido en el que se registró el cambio.

Por otro lado, el valor de pH (6.5 en promedio), está muy cercano al valor óptimo de disponibilidad de nutrimentos para la mayoría de los cultivos. En caso de mantener el incremento actual, en dos años más el suelo tendría un pH alcalino, lo cual, desde cualquier punto de vista, es negativo. Sin embargo, se debe recordar que este tipo de agricultura se presentará por dos o tres ciclos cada diez años, que es cuando se

Cuadro 5. Análisis en extractos de saturación de suelo (pH y CE). Ejido Favela. Ciclo 1992.

Profundidad cm	Mayo			Noviembre		
	pH	CE [†] dS m ⁻¹	Clasificación	pH	CE dS m ⁻¹	Clasificación
0-15	6.07	0.37	No salino	6.8	2.32	No salino
15-37	5.85	0.37	No salino	6.4	0.99	No salino
37-80	6.0	0.50	No salino	6.4	0.82	No salino

[†]CE = Conductividad eléctrica.

confinan grandes volúmenes de agua, producto de lluvias pico, que rebasan considerablemente el promedio en los otros ocho años dentro del proceso productivo.

Los valores de CE se incrementaron también, en especial en la capa superficial (0 a 15 cm). Este cambio se consideró grave, ya que pasó de 0.37 a 2.32 mmho cm⁻¹; de continuar así, el próximo ciclo fácilmente rebasará 4.0 mmho cm⁻¹, que lo convierte en un suelo salino con los inconvenientes naturales de este tipo de suelos. En este sentido cabe recordar que el suelo en estudio se seleccionó que fuese arenoso, para que durante los ocho años, que no se usara agua de la Laguna, las sales acumuladas pudiesen lixiviarse con el agua de lluvia.

Los estratos inferiores (15 a 37; 37 a 80 cm) tuvieron incrementos no muy espectaculares, pero sí de consideración. Es importante aclarar que los resultados sobre salinidad del suelo son debido a que, además de las sales, introducidas por la mala calidad del agua, están las sales aportadas por la fertilización de los cultivos anteriores (160-80-100 en trigo y 40-60-0 en frijol de N-P₂O₅-K₂O, respectivamente), (Cuadro 5).

Cambios ocurridos en el agua. Los análisis practicados, de acuerdo con Solano *et al.* (1992), reportaron que desde el inicio del estudio, el agua de la Laguna estaba clasificada como C₃ S₁, mientras que al final del ciclo cambió la clasificación del agua, básicamente con respecto al sodio, ya que se anotó C₃ S₄. De acuerdo con estas características, el agua era considerada como no recomendable para la producción agrícola. Otro aspecto importante fue la variación de S₁ a S₄, lo cual pone de manifiesto el fuerte cambio sobre la relación de adsorción de sodio (RAS), pasando de 4 a 41 meq L⁻¹. Esto demostró que la ausencia de escurrimientos superficiales abundantes (en 1991, 574 mm de precipitación y en 1992 sólo 227 mm), provocó que el agua de la Laguna mostrara concentraciones salinas fuertes, debido a que no hubo suficiente agua para diluirlas.

CONCLUSIONES

- El análisis de suelo practicado al final del ciclo mostró cambios preocupantes, tanto en pH como en conductividad eléctrica (CE). La calidad del agua, a través del tiempo (mayo a noviembre), cambió de C₃ S₁ a C₃ S₄. Por el lado positivo, el suelo reportó incrementos en el nivel natural de fósforo y potasio.
- No obstante los cambios en pH y CE, se puede usar el agua de la Laguna de Bustillos como fuente de riego para producir maíz al nivel de 5.0 t ha⁻¹ de grano (en dos de cada 10 años), sin que el producto presente contaminación por elementos pesados, que pongan en riesgo la salud humana.
- Para hacer efectivo el proceso de producción de maíz, se sugiere usar fertilizantes químicos, la dosis adecuada fluctúa de 100 a 250 kg ha⁻¹ de nitrógeno y de 50 a 100 kg ha⁻¹ de fósforo.

LITERATURA CITADA

- Aguilera C., M. y R. Martínez E. 1986. Relaciones agua-suelo-planta-atmósfera. 3a ed. Departamento de Enseñanza, Investigación y Servicio en Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.
- Amado A., J.P., P. Ortiz F., V. Solano, F. Orozco V. y S. Ramírez V. 1991a. Calidad del agua y el suelo para uso agropecuario en la región aledaña a la Laguna de Bustillos, Chih. p. 225. In: J.L. Tovar S. y R. Quintero L. (eds.). La Investigación Edafológica en México 1990-1991. Memorias del XXIV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Pachuca, Hgo. México.
- Amado A., J.P., P. Ortiz F., V. Solano R., F. Orozco V. y S. Ramírez V. 1991b. Uso del agua de la Laguna de Bustillos para la germinación de especies agrícolas. CESICH-CIFAP-Norte Centro-INIFAP-SARH. Cd. Cuauhtémoc, Chih. (Informe de Investigaciones, sin publicar).
- American Public Health Association and American Water Works Association. 1946. Standard methods for the examination of water and sewage. ed. 9. New York.
- Association of Official Agricultural Chemists. 1950. Official and tentative methods of analysis of the Association of Official Agricultural Chemists. ed. 7. Washington.
- Barber, H.H. e I.M. Kolthoff. 1928. A specific reagent for the rapid gravimetric determination of sodium. Am. Chem. Soc. J. 50: 1625-1631.

- Bouyoucos, G.J. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soil. *Agron. J.* 54: 464-465.
- Bremer, J.M. 1965. Total nitrogen. pp. 1149-1178. *In*: C. A. Black (ed.). *Methods of soil analysis. Part 2.* Am. Soc. of Agron. Madison, Wisconsin.
- Briones S., G. y A. Elizondo S. 1985. Factibilidad de la irrigación agrícola con aguas residuales de cervecaría. *Terra* 3: 144-150.
- Carrillo G., R., L.J. Cajuste y L. Hernández H. 1992. Acumulación de metales pesados en un suelo regado con aguas residuales. *Terra* 10: 166-173.
- Cheng, K.L. y H.R. Bray. 1951. Determination of calcium and magnesium in soil and plant material. *Soil Sci.* 72: 449-458.
- CNA. Comisión Nacional del Agua. 1989. Dictamen técnico del diagnóstico preliminar del posible aprovechamiento de la Laguna de Bustillos para uso agrícola. CNA, México.
- Cuanalo D., L.C. 1975. Manual para la descripción de perfiles de suelo en campo. Colegio de Postgraduados. Escuela Nacional de Agricultura. Chapingo, México.
- Goijberg R., G. y A. Aguilar S. 1987. pH del suelo y necesidades de cal. pp. 17-40. *In*: A. Aguilar S., J.D. Etchevers B. y J.Z. Castellanos R. (eds.). *Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo.* Publicación Especial 1. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, Edo. de México.
- Guajardo V., R., L. Rodríguez D. y T. Méndez G. 1992. Evaluación de los grados de contaminación del Río Atoyac, Edo. de Puebla, por metales pesados, grasas y aceites p. 110. *In*: J.L. Tovar S. y R. Quintero L. (eds.). *La Investigación Edafológica en México 1991-1992.* Memorias del XXV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Acapulco, Gro, México.
- Hatcher, J.T. y L.V. Wilcox. 1950. Colorimetric determination of boron using carmine. *Anal. Chem.* 22: 567-569.
- Jackson, M.L. 1970. *Análisis químico de suelos.* Trad. al español del Ing. José Beltrán Martínez. 2a ed. Omega. Barcelona, España.
- León A., R. y A. Aguilar S. 1987. Materia orgánica. pp. 85-91. *In*: A. Aguilar S., J.D. Etchevers B. y J.Z. Castellanos R. (eds.). *Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo.* Publicación Especial 1. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Chapingo, Edo. de México.
- Lindsay, W.L. y W. A. Norvell. 1978. Development of a DTPA soil, zinc, iron, manganese and copper. *J. Am. Sci. Soil* 42: 421-428.
- Little, M.T. y F.H. Jackson. 1979. *Métodos estadísticos para la investigación en la agricultura.* Trillas, México, DF.
- López A., J.G., J. Molina O., J. Fariás L., S. Guzmán G. y A. Michel R. 1997. Utilización de desechos de la industria cítrica en el mejoramiento de suelos salinos. *Terra* 15: 329-336.
- Macnicol, R.D. y P.H.T. Beckett. 1985. Critical issue concentrations of potentially toxic elements. *Plant Soil* 85: 107-129.
- Méndez G., T.J. y L. Rodríguez M. 1996. Niveles de contaminación de las aguas del río Atoyac, estado de Puebla, por metales pesados, boro, grasas y aceites. *Terra* 14: 137-149.
- Olsen, S., R.V. Cole, F.S. Watanabe y C.A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soil by extraction with sodium bicarbonate. *US Dept. Agr. Circ.* 939-943.
- Ortiz F., P., F. Orozco V. y V.D. Solano R. 1990. La fertilización en la agricultura de temporal. Cuadro Básico de Fertilización Chihuahua. Publicación Especial 3. CESICH-CIFAP-CHIHUAHUA-INIFAP-SARH. Cd. Cuauhtémoc, Chih. México.
- Palacios V., E. 1982. Respuesta de algunos cultivos a regímenes variables de la humedad en el suelo. Recopilación de artículos publicados en diferentes revistas técnicas. Centro de Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. Chapingo, México.
- Rodier J., Ch.G., G. Kovacsik, J. Laporte, M. Plissier, J. Scheidhaver, J. Verneaux, J. Vial y L. Rodi. 1981. *Análisis de las aguas, aguas naturales, aguas residuales, agua de mar.* Química, Fisicoquímica, Bacteriología. Traducción al español de Santiago Balqué Dolz. Omega. Barcelona, España.
- Rojas M., B.A. 1981. Planeación y análisis de los experimentos de fertilizantes. Folleto Misceláneo 41. INIA-SARH. México, DF.
- Solano R., V., J.P. Amado A. y P. Ortiz F. 1992. Uso del agua de la Laguna de Bustillos para la producción de trigo. CESICH-CIRNOC-INIFAP. Cd. Cuauhtémoc, Chihuahua. Informe de investigación, sin publicar.
- Tserling, V.V. 1969. Diagnosis of nutrition of plants. pp. 706-709. *In*: *Agronomical methods in study of soils.* Dokuchaev Inst. of Soil Sci. Academy of Sci. of the URSS. Translated from Russian.
- US-EPA. 1973. Water quality criteria. EPA. RE/73-033 197. US Environmental Protection Agency. Washington, DC. Determination of potassium with dipicrylamine. *Am. Soc. Hort. Sci. Proc.* 39: 47-50.
- Wilcox, L.V. 1950. Electrical conductivity. *Am. Water Works Assoc. J.* 42: 775-776.
- Williams, W.D. 1941. Rapid determination of potassium with dipicrylamine. *Am. Soc. Hort. Sci. Proc.* 39: 47-50.

OPTIMIZACION DEL RIEGO CON CINTA SUPERFICIAL Y ENTERRADA EN ESPARRAGO

Optimizing Irrigation with Surface and Subsurface Trickle on Asparagus

Adán Fimbres Fontes¹

RESUMEN

El espárrago es un cultivo altamente rentable en la región, y su destino es de 100% al mercado de exportación. La superficie de este cultivo se ha incrementado últimamente en la región de Caborca, Sonora, México, donde actualmente se cuentan con 6000 ha, aproximadamente. El agua es uno de los factores importantes en la producción de este cultivo; por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue: optimizar la cantidad de agua por aplicar al espárrago y determinar la mejor posición de la manguera al aplicar el agua al cultivo: superficial o enterrada. Este trabajo se llevó a cabo en el campo experimental Caborca, durante 1998 y 1999, en espárrago, variedad Atlas, plantado el 10 de febrero de 1997. Los tratamientos consistieron en la aplicación de los siguientes porcentajes de Evapotranspiración (ET) con base en un tanque evaporímetro, tipo A: 50, 70 y 100% ET, en las dos modalidades manguera superficial y enterrada. Se evaluó la lámina de agua aplicada, altura de la planta, clasificación 'large' (grande) del espárrago y rendimiento. Los resultados indicaron que el tratamiento que mejor optimiza el agua, sin menoscabo en la producción, es 100% ET con rendimiento de 489 cajas ha⁻¹ y lámina de riego de 188.88 cm. También se encontró que la mejor forma de regar al espárrago es con manguera enterrada.

Palabras clave: Irrigación, riego por goteo, agua con alta presión, evapotranspiración, turión.

SUMMARY

Asparagus is a very profitable crop in the region of Caborca, Sonora, Mexico; 100% of the crop is exported. The area under cultivation of this crop has

¹ Campo Experimental Caborca. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Apartado Postal 125, 83600 Caborca, Son. México.
(afimbres@computec.net)

Recibido: Abril de 2000. Aceptado: Abril de 2001.
Publicado en Terra 19: 191-195.

increased recently in the region and it is now grown on approximately 6000 ha. Water is an important factor in production, and the objective of this study was to determine the optimum amount of water to apply and the better position of the hose: surface or subsurface. This work was done in the Experimental Station of Caborca, Sonora, Mexico, with asparagus, var. Atlas, planted on February 10, 1997. Treatments were 50, 70, and 100% evapotranspiration with an evaporation pan type A for both trickle and subsurface positions. The evaluated variables were water applied, plant height, class 'large' asparagus, and yield. The results indicated that the optimum treatment for water was 100% ET and application depth of 188.88 cm, which produced a yield of 489 boxes ha⁻¹. It was also found that the better position of the irrigation hose was subsurface.

Index words: Irrigation, trickle irrigation, high water pressure, evapotranspiration, spear.

INTRODUCCION

El espárrago es una opción más para el cambio de cultivos en la región de Caborca, Sonora, México, debido principalmente a la adaptabilidad de éste a los suelos salinos y agua con contenido medio de sales; también su alta reutilidad en el mercado internacional lo hace un cultivo muy atractivo.

En cuanto a los requerimientos de agua por el cultivo del espárrago, Roth y Gardner (1989) indicaron, que para obtener máximos rendimientos (10 872.25 a 18 718.21 kg ha⁻¹) era necesaria una lámina de agua que variaba entre 270 cm y 310 cm y que la cantidad de nitrógeno aplicado variaba de 370 a 630 kg N ha⁻¹).

Robinson *et al.* (1984) indicaron que 42 mm de lámina de agua, aplicada dos veces por semana durante toda la temporada del espárrago, en un suelo arenoso en el sureste de California, era suficiente para una buena cosecha de espárrago, lo cual totalizaba una lámina de agua de 336 cm.

Roth y Gardner (1990) indicaron que, cuando se redujeron las aplicaciones de agua, no se afectó la cantidad de espárrago durante los primeros 20 días (de

ese año), pero los rendimientos se disminuyeron en los siguientes 40 días de cosecha. En caso de aplicaciones bajas de nitrógeno, esto causó la reducción del espárrago durante toda la época de cosecha.

Sterrett *et al.* (1990) probaron diferentes tratamientos y sistemas de riego presurizado sobre el rendimiento de espárrago y concluyeron que, de todos los métodos de riego el de manguera enterrada resultó con el mayor incremento en la producción de espárrago en comparación con el testigo (no riego).

Navarro *et al.* (1997), en un trabajo de espárrago bajo riego de gravedad en la región de Caborca, concluyeron que es mejor regar con 35% de humedad aprovechable durante el período de postcosecha del espárrago, lo cual significa una frecuencia de riego durante primavera y otoño de 19 días y durante el verano de 14 días (durante la cosecha los riegos fueron más frecuentes). La lámina total aplicada a este tratamiento fue de 277.6 cm, y al más húmedo de 374.11 cm.

Fimbres y Valenzuela (1998) indicaron que el promedio de agua aplicada al espárrago bajo riego de gravedad fue de 450 cm. Fimbres *et al.* (1998) indicaron que la lámina aplicada al espárrago bajo riego por goteo en el tratamiento más húmedo fue de 246.13 cm de agua y al tratamiento más seco de 121.97 cm.

La región de Caborca cuenta actualmente con una superficie de espárrago aproximada de 6000 ha. Las técnicas de producción utilizadas en California, EUA, son similares para el espárrago de la región de Caborca; sin embargo, algunas no es posible aplicarlas o bien se pretende mejorar algunos factores importantes como es el riego, sobre todo cuando el agua se aplica bajo riego por goteo. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo fue: optimizar la cantidad de agua por aplicar al espárrago y determinar el mejor método de riego para el cultivo: superficial o enterrado.

MATERIALES Y METODOS

El presente trabajo se realizó en el campo experimental de Caborca, Sonora, México, en un suelo de textura migajón arenoso, durante 1998 y 1999, en el cultivo del espárrago, variedad Atlas, que se sembró el 10 de febrero de 1997. Se sembró a doble hilera con una densidad de población de 40 000 plantas ha⁻¹. El fertilizante se aplicó a través del

sistema de riego por goteo y la cantidad durante toda la temporada fue de 200 kg ha⁻¹ de nitrógeno. Los tres tratamientos aplicados (B) resultaron de la combinación de la evapotranspiración estimada en un tanque evaporímetro (50%, 70% y 100% ET) y la forma (A) de poner la manguera (superficial y enterrada). Esto se hizo en un diseño de parcelas divididas con cuatro repeticiones y los coeficientes (K) al 100% de ET fueron: 1.0 durante enero, febrero y marzo, 0.80 en abril, 0.90 para mayo, 1.0 en junio, 0.80 para julio y agosto, y 0.70 para septiembre y octubre. Las variables medidas fueron: lámina de agua aplicada, altura de planta, clasificación 'large' (grande) y rendimiento. El espárrago, a diferencia de otros cultivos, no se cosecha todo a la vez, sino que los cortes se hacen a diario (también cada tercer día) durante los meses de enero a marzo y, por esto, se incluyen los datos y el análisis estadístico que se hizo en cada corte. Comercialmente, el espárrago se clasifica en 'small' (pequeño), 'medium' (mediano), y 'large' (grande). En el caso de este experimento sólo se incluyó la variable clasificación 'large' (grande) para determinar mejor los efectos del agua sobre el espárrago. Se contaron el número de turiones clasificación 'large' (grande) por cada 25 metros lineales.

RESULTADOS Y DISCUSION

En el Cuadro 1, se muestra la altura de la planta y la lámina de riego aplicada durante todo el ciclo. Se observa que hubo diferencia altamente significativa entre tratamientos, siendo el tratamiento de 100% de la evapotranspiración (ET) el de mayor altura, sobre todo en el año de 1999, y 50% de ET el de menor altura, en ambos años. La lámina de agua aplicada al espárrago durante todo el año para el tratamiento de 100% ET promedió 188.88 cm y 93.60 cm para 50% ET.

Cuadro 1. Altura de la planta y lámina aplicada en espárrago. CECAB, INIFAP. 1998 y 1999.

Tratamiento (ET)	Lámina aplicada		Altura de planta	
	1998	1999	1998	1999
	cm		m	
100%	195.13	182.64	1.93 a	2.14 a
70%	117.42	109.91	1.75 a	1.82 b
50%	96.70	90.51	1.29 b	1.57 c

Cifras con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey 0.05).

Cuadro 2. Cajas por hectárea del espárrago en el corte del 20 de enero al 10 de febrero. CECAB, INIFAP 1998-1999.

ET	20/1	22/1	25/1	27/1	29/1	1/2	4/2	8/2	10/2	Subtotal
%										
100	10 a	17 a	69 a	22 a	22 a	32 a	32 a	42 a	30 a	276
70	6 b	8 b	44 b	17 a	13 b	19 b	26 ab	35 b	27 ab	195
50	3 b	5 b	26 c	11 b	11 b	15 b	21 b	20 c	19 b	141

Cifras con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey 0.05).

Cuadro 3. Cajas por hectárea del espárrago en el corte del 12 febrero al 3 de marzo y rendimiento total. CECAB, INIFAP 1998-1999.

ET	12/2	15/2	17/2	19/2	22/2	24/2	26/2	3/1	3/3	Total	kg ha ⁻¹
%											
100	18 a	31 a	18 a	21 a	36 a	20 a	25	38 a	34 a	517	5628
70	15 ab	26 ab	16 a	18 ab	26 b	21 a	26	32 a	26 a	401	4365
50	11 b	20 b	11 b	15 b	26 b	15 b	18	24 b	19 b	290	3157

Cifras con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey 0.05).

Cuadro 4. Cajas por hectárea del espárrago en el corte del 25 de enero al 14 de febrero. CECAB, INIFAP. 1999-2000.

ET	25/1	28/1	31/1	2/2	4/2	7/2	9/2	11/2	14/2	Subtotal
%										
100	9 a	11 a	10 a	10 a	8 a	14 a	14 a	13 a	20 a	109
70	7 a	8 ab	7 ab	8 ab	5 b	10 ab	11 ab	10 b	17 a	83
50	3 b	4 b	5 b	5 b	4 c	6 b	6 b	7 b	12 b	52

Cifras con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey 0.05).

Cuadro 5. Cajas por hectárea del espárrago en el corte del 16 de febrero al 10 de marzo. CECAB, INIFAP. 1999-2000.

ET	16/2	18/2	21/2	23/2	25/2	28/2	1/3	3/3	7/3	10/3	Subtotal
%											
100	17 a	15 a	22 a	16 a	14 a	19	14	17 a	25 a	20 a	179
70	14 ab	12 b	18 ab	13 ab	13 ab	17	10	13 ab	20 ab	18 ab	148
50	11 b	11 b	13 b	11 b	9 b	16	11	11 b	15 b	12 b	120

Cifras con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey 0.05).

Cuadro 6. Cajas por hectárea del espárrago en el corte del 13 al 31 de marzo y rendimiento total. CECAB, INIFAP. 1999-2000.

ET	13/3	15/3	17/3	20/3	22/3	25/3	27/3	29/3	31/3	Total	kg ha ⁻¹
%											
100	24 a	16	15 a	16	13	19	24 a	23 a	23 a	461	5018
70	22 ab	15	10 ab	11	12	17	22 ab	18 ab	20 a	378	4115
50	18 b	14	6 b	10	10	15	17 b	13 b	13 b	288	3135

Cifras con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey 0.05).

En los Cuadros 2 y 3 se muestra el rendimiento de espárrago por corte y total en el ciclo y se observa que en la cosecha del 20 de enero al 3 de marzo del ciclo 1998-1999 se encontró diferencia significativa (Tukey 5%) entre tratamientos, siendo 100% ET estadísticamente mayor que 70% ET en siete cortes y en 17 cortes superior al 50% ET, lo cual se reflejó, al final de la temporada, en una mayor producción ya que 100% de ET obtuvo 517 cajas ha⁻¹ (5628 kg ha⁻¹)

y el tratamiento de 50% ET sólo 290 cajas ha⁻¹ (3157 kg ha⁻¹).

En los Cuadros 4, 5 y 6 se muestran las cosechas del 25 de enero al 31 de marzo, ciclo 1999-2000; se encontró diferencia significativa (Tukey 5%) entre tratamientos, siendo 100% ET y 70% ET los de mayor rendimiento. Cabe señalar que 70% ET resultó estadísticamente menor en tres cortes, lo cual se reflejó al final del ciclo en donde 100% ET fue el de

Cuadro 7. Cajas por hectárea/corte del espárrago en la variable posición de manguera. CECAB, INIFAP. 1998-1999.

Posición	19/2	3/3	Media
Superficial	20 a	30 a	25
Enterrada	16 b	21 b	19

Cifras con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey 0.05).

Cuadro 9. Cantidad de turiones por 25 m clasificación 'large' (grande) del 8 al 19 de febrero. CECAB, INIFAP. 1998-1999.

ET	8/2	10/2	12/2	15/2	17/2	19/2	Media
%							
100	17 a	13 a	10 a	14 a	10 a	12 a	13
70	10 ab	11 a	8 a	9 b	9 a	10 a	10
50	3 b	2 b	2 b	3 c	1 b	3 b	2

Cifras con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey 0.05).

Cuadro 10. Cantidad de turiones por 25 m clasificación 'large' (grande) del 9 al 21 de febrero. CECAB, INIFAP. 1999-2000.

ET	9/2	11/2	14/2	16/2	18/2	21/2	Media
%							
100	17 a	19 a	26 a	24 a	29 a	35 a	25
70	15 a	14 b	25 a	18 a	24 a	26 a	20
50	4 b	5 c	9 b	8 b	11 b	11 b	8

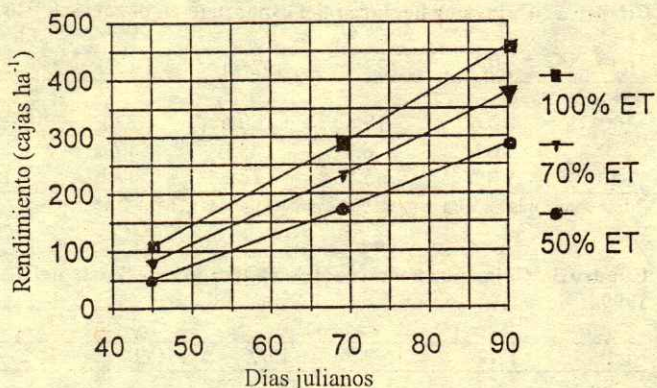
Cifras con la misma letra son estadísticamente iguales (Tukey 0.05).

mayor producción con 461 cajas ha⁻¹ (5118 kg ha⁻¹) y el tratamiento de 70% ET con sólo 378 cajas ha⁻¹ (4115 kg ha⁻¹). En la Figura 1, se muestran estos mismos porcentajes de evapotranspiración durante todo el período de cosecha del espárrago y también se observa que, desde el inicio, 100% ET obtuvo el mayor rendimiento en comparación con los otros tratamientos.

En los Cuadros 7 y 8, se muestra el rendimiento por corte, de acuerdo con la posición de la manguera durante los dos años. Se puede observar que la posición de manguera superficial obtuvo mayor rendimiento sólo en dos cortes, durante 1998. Sin embargo, en 1999, los resultados se revirtieron, ya que manguera enterrada fue la de mayor rendimiento en seis cortes de espárrago con promedio final de 22 cajas ha⁻¹.

Cuadro 8. Cajas por hectárea/corte del espárrago en la variable posición de manguera. CECAB, INIFAP. 1999-2000.

Posición	18/2	21/2	25/2	1/3	3/3	20/3	27/3	Media
Superficial	11 b	22 b	10 b	10 b	13 b	21 a	19 b	15
Enterrada	19 a	41 a	14 a	14 a	21 a	14 b	30 a	22

**Figura 1. Rendimiento en espárrago. (CECAB-INIFAP. 1999-2000).**

En los Cuadros 9 y 10 se muestra la clasificación 'large' (grande) del espárrago. En estos cuadros, se muestra la clasificación 'large' (grande) y se observa que hubo diferencia significativa (Tukey 5%) entre tratamientos, siendo los tratamientos de 100 y 70% los de mayor clasificación 'large', tanto en 1998, como en 1999, mientras que 50% de ET fue el de menor clasificación 'large' en ambos años. Cabe señalar que 70% ET resultó estadísticamente menor en este tipo de clasificación en dos cortes de espárrago, por lo que existe la tendencia de producir más espárrago de clasificación 'large' cuando se riega al 100% ET, que cuando se riega al 70% ET.

CONCLUSIONES

Con base en los resultados obtenidos, es posible concluir que el espárrago bajo riego por goteo es un cultivo que requiere de humedad constante, que aunque resiste sequía, no es posible estresarlo en tiempo de cosecha, ya que esto pudiera traer consecuencias graves afectando el grosor y turgencia de los turiones. Por lo tanto, el tratamiento que mejor optimiza el agua en espárrago, sin menoscabo en la producción, es 100% ET con rendimiento promedio de 489 cajas ha⁻¹ y lámina de riego de 188.88 cm. También se encontró que el mejor método de regar al espárrago es con manguera enterrada.

AGRADECIMIENTO

Se agradece al Sr. Juan Manuel Torres Aceves por su valiosa ayuda en lo referente a los datos de campo, ya que sin él no hubiera sido posible esta publicación.

LITERATURA CITADA

- Fimbres F., A. y M.J. Valenzuela R. 1998. Determinación de las necesidades de agua para espárrago bajo riego de gravedad. p. 147. *In: Memorias del 29o Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*. Tapachula, Chiapas.
- Fimbres F., A., R.L. Grijalva C. y M.J. Valenzuela R. 1998. Study of the regular and high application of water with drip irrigation in asparagus. *HortSci*. 33: 455.
- Navarro A., J.A., F. Contreras R., A. Fimbres F. y R.L. Grijalva C. 1997. Necesidades de agua y fertilización en espárrago. p. 93. *In: Memorias VII Congreso Nacional de Horticultura*. Sociedad Mexicana de Ciencias Hortícolas. (SOMECH).
- Robinson, F.E., W.L. Berry, D.J. Scherer y T.R. Thomas. 1984. Yield potential of asparagus irrigated with geothermal and ground water on Imperial East Mesa Desert, California. *HortSci*. 19: 407-408
- Roth, R.L. y B.R. Gardner. 1989. Asparagus yield response to water and nitrogen. *Transactions of the ASAE* 32: 105-112.
- Roth, R.L. y B.R. Gardner. 1990. Asparagus response to water, nitrogen and temperature. *Visions of the Future*. pp. 507-512. *In: Proceedings of the third National Irrigation Symposium*. ASAE. Phoenix, AZ.
- Sterrett, S.B., B.B. Ross y C.P. Savage Jr. 1990. Establishment and yield of asparagus as influenced by planting and irrigation method. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 115: 29-33.

CARTA AL EDITOR

PROGRAMA DE INTERCOMPARACION DE ANALISIS DE SUELOS Y DE PLANTAS

El Programa de Calidad e Intercomparación de Análisis Químico de Suelos y de Plantas (ISP) inició en febrero de 1997 con el apoyo de la **Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo** con la participación de 35 laboratorios. En diciembre de 1998, el grupo del trabajo del LAFER presentó al CONACYT el proyecto "Confiableidad de los Resultados Analíticos Generados por los Laboratorios de Análisis de Suelos y Plantas de la República Mexicana", estrechamente relacionado con el ISP, el cual fue aprobado (CONACYT 29002-B) y será apoyado hasta diciembre de 2001.

Los objetivos del ISP son: mejorar la calidad analítica de los resultados de los laboratorios de análisis químico del suelo y planta, evaluar la exactitud de las mediciones analíticas, haciendo uso de materiales de referencia certificados, y preparar estándares de referencia certificados de vegetal y de suelo en coordinación con el Centro Nacional de Metrología.

A cuatro años de iniciado el Programa ISP, es importante resaltar que los representantes de los laboratorios están cada vez más convencidos de la necesidad de invertir tiempo, energía y recursos económicos en las actividades de control de calidad, para demostrar al cliente, por un lado, que los datos que se entregan son confiables y, por el otro, para poner de manifiesto que lo publicado en la literatura científica es digno de credibilidad.

A la fecha, han participado en el ISP 70 laboratorios de 22 estados de la República Mexicana y tres laboratorios de Guatemala. Se han enviado 17 muestras de suelos procedentes de ocho estados de la República y de Guatemala. Se han circulado también muestras de 17 especies de vegetal. Los participantes reciben dos muestras de suelos y dos de vegetal cada seis meses preparados por el propio programa. Se les hizo llegar a los socios dos materiales de referencia certificados de vegetal procedentes del NIST con la finalidad de evaluar la exactitud de las mediciones, la cual en el futuro se hará utilizando materiales de referencia del Centro Nacional de Metrología de México. En este año está en proceso de preparación un estándar de hojas de maíz. En el futuro se preparará un estándar de suelo y participarán en la generación de éste los mejores laboratorios que realizan análisis químicos de suelos.

Para generar datos de calidad, es imprescindible la capacitación del personal involucrado por lo que, en 1999, se realizó en el Colegio de Postgraduados el curso **Control de Calidad en Análisis de Suelos y de Plantas** y, en 2000, el curso **Control de Calidad y Validación de Métodos**, a los cuales asistieron los representantes de los laboratorios participantes.

Información:

M. en C. Rosa Ma. López Romero

Coordinadora del Programa ISP

Tel.-Fax: (5) 9511475

Conmutador (5) 9520200 ext. 1234 y 1237

(rosal@colpos.colpos.mx)